

# 以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化 之研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 102 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)



# 以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化 之研究

受委託者           ：國立臺灣科技大學  
研究主持人        ：陳君弢  
研究員             ：李宏仁  
研究助理           ：吳靖賢  
研究助理           ：韋昀孜

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 102 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

表次 .....	III
圖次 .....	IX
摘要 .....	XV
第一章 緒論 .....	1
第一節 研究緣起與背景 .....	1
第二節 研究目的與重要性 .....	3
第三節 研究方法與步驟 .....	4
第二章 文獻回顧 .....	7
第一節 前言 .....	7
第二節 腐蝕機理 .....	7
第三節 以腐蝕速率變化推估鋼筋腐蝕量 .....	10
第四節 腐蝕量測法 .....	11
第五節 足尺寸構件試體試驗 .....	18
第三章 小尺寸試體試驗 .....	25
第一節 前置作業 .....	25
第二節 研究方法 .....	31
第三節 試驗結果 .....	38
第四章 足尺寸構件試體試驗 .....	69
第一節 柱設計方法及檢核 .....	69
第二節 腐蝕鋼筋柱構件試體製作 .....	75
第三節 試驗結果 .....	78
第四節 足尺寸貼磚試體試驗 .....	96
第五節 計算腐蝕量與重量損失比較 .....	111
第五章 現地鋼筋腐蝕量測步驟 .....	113
第一節 前言 .....	113
第二節 以脈衝電流法測定鋼筋腐蝕速率 .....	113
第三節 以腐蝕速率推算腐蝕量 .....	115
第六章 結論與建議 .....	117
第一節 結論 .....	117
第二節 建議 .....	119
附錄一 專家座談會議紀錄與意見回覆 .....	123
附錄二 期中審查會議紀錄與意見回覆 .....	133
附錄三 期末審查會議紀錄與意見回覆 .....	149

**參考書目** ..... **165**

## 表次

表 2 - 1	腐蝕機率判斷表 .....	12
表 2 - 2	Galva Pulse 一般試驗值 .....	16
表 3 - 1	鋼筋機械性質 .....	25
表 3 - 2	鋼筋化學成分 .....	26
表 3 - 3	直流電源供應器詳細規格 .....	28
表 3 - 4	GalvaPulse 腐蝕量測儀規格概要 .....	29
表 3 - 5	VersaSTAT 恆電位恆電流儀規格概要 .....	30
表 3 - 6	水灰比 0.6、6 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： μA/cm <sup>2</sup> ).....	38
表 3 - 7	水灰比 0.6、保護層厚度 3 cm 之鋼筋腐蝕電流 密度 (單位：μA/cm <sup>2</sup> ) .....	40
表 3 - 8	水灰比 0.6、保護層厚度 9 cm 之鋼筋腐蝕電流 密度 (μA/cm <sup>2</sup> ) .....	41
表 3 - 9	不同保護層厚度下計算腐蝕量與重量損失之關 係 (水灰比：0.6) .....	41
表 3 - 10	水灰比 0.4、保護層厚度 6 cm 之鋼筋腐蝕電流 密度 (單位：μA/cm <sup>2</sup> ) .....	46
表 3 - 11	水灰比 0.5、保護層厚度 6 cm 之鋼筋腐蝕電流 密度 (單位：μA/cm <sup>2</sup> ) .....	46
表 3 - 12	水灰比 0.4、保護層厚度 3 cm 之鋼筋腐蝕電流 密度 (單位：μA/cm <sup>2</sup> ) .....	46
表 3 - 13	不同水灰比下計算腐蝕量與重量損失之關係 (保護層厚度：6 cm).....	47
表 3 - 14	水灰比 0.4 下計算腐蝕量與重量損失之關係 .....	47
表 3 - 15	混凝土配比設計(SSD) (單位：kg/m <sup>3</sup> ).....	52
表 3 - 16	水灰比 0.6、粗粒料被細粒料取代 1/2 之鋼筋 腐蝕電流密度 (單位：μA/cm <sup>2</sup> ) .....	53

表 3 - 17	水灰比 0.6、粗粒料被細粒料取代 1/3 之鋼筋 腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	53
表 3 - 18	水灰比 0.6、混凝土之鋼筋腐蝕電流密度 (單 位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	53
表 3 - 19	不同粗細粒料體積比下計算腐蝕量與重量損 失之關係 (保護層厚度：6 cm).....	54
表 3 - 20	水灰比 0.6、含橫向鋼筋配置之鋼筋腐蝕電流 密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	58
表 3 - 21	橫向鋼筋存在下計算腐蝕量與重量損失之關 係 (保護層厚度：6 cm).....	58
表 3 - 22	不同脈衝電流與施加時間下之鋼筋腐蝕電流 密度.....	61
表 3 - 23	不同過電壓與量測間隔時間下之鋼筋腐蝕電 流密度.....	64
表 4 - 1	試體參數設計.....	69
表 4 - 2	混凝土抗壓試驗結果.....	74
表 4 - 3	足尺寸 I 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	79
表 4 - 4	足尺寸 I 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	79
表 4 - 5	足尺寸 I 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	80
表 4 - 6	足尺寸 I 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	80
表 4 - 7	足尺寸 I 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	81
表 4 - 8	足尺寸 I 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	81
表 4 - 9	足尺寸 I 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	82
表 4 - 10	足尺寸 I 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	82
表 4 - 11	足尺寸 I 柱計算腐蝕量與重量損失之關係.....	83
表 4 - 12	足尺寸 II 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) .....	85
表 4 - 13	足尺寸 II 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) .....	85

表 4 - 14	足尺寸 II 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	85
表 4 - 15	足尺寸 II 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	86
表 4 - 16	足尺寸 II 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	86
表 4 - 17	足尺寸 II 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	86
表 4 - 18	足尺寸 II 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	87
表 4 - 19	足尺寸 II 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	87
表 4 - 20	足尺寸 II 柱計算腐蝕量與重量損失之關係	87
表 4 - 21	足尺寸 III 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	89
表 4 - 22	足尺寸 III 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	90
表 4 - 23	足尺寸 III 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	90
表 4 - 24	足尺寸 III 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	91
表 4 - 25	足尺寸 III 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	91
表 4 - 26	足尺寸 III 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	92
表 4 - 27	足尺寸 III 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	92
表 4 - 28	足尺寸 III 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	93

表 4 - 29	足尺寸 III 柱計算腐蝕量與重量損失之關係.....	93
表 4 - 30	足尺寸箍筋的重量損失.....	95
表 4 - 31	混凝土配比設計表.....	96
表 4 - 32	貼磚足尺寸 I 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	98
表 4 - 33	貼磚足尺寸 I 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	99
表 4 - 34	貼磚足尺寸 I 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	99
表 4 - 35	貼磚足尺寸 I 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	100
表 4 - 36	貼磚足尺寸 I 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	100
表 4 - 37	貼磚足尺寸 I 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	101
表 4 - 38	貼磚足尺寸 I 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	101
表 4 - 39	貼磚足尺寸 I 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	102
表 4 - 40	貼磚足尺寸 I 柱與重量損失之關係.....	102
表 4 - 41	貼磚足尺寸 II 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	104
表 4 - 42	貼磚足尺寸 II 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	104
表 4 - 43	貼磚足尺寸 II 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	104
表 4 - 44	貼磚足尺寸 II 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	105

表 4 - 45	貼磚足尺寸 II 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	105
表 4 - 46	貼磚足尺寸 II 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	105
表 4 - 47	貼磚足尺寸 II 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	106
表 4 - 48	貼磚足尺寸 II 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	106
表 4 - 49	貼磚足尺寸 II 柱與重量損失之關係.....	106
表 4 - 50	貼磚足尺寸箍筋與真實重量損失之關係.....	107
表 4 - 51	小尺寸砂漿試體中鋼筋的計算腐蝕量與重 量損失比較.....	111
表 4 - 52	小尺寸混凝土試體中鋼筋的計算腐蝕量與 重量損失比較.....	112
表 4 - 53	足尺寸貼覆磁磚混凝土試體中鋼筋的計算 腐蝕量與重量損失比較.....	112



## 圖次

圖 1 - 1	老舊校舍腐蝕構件照片 .....	1
圖 1 - 2	研究方法與相互關係 .....	5
圖 2 - 1	鋼筋之腐蝕反應示意圖 .....	9
圖 2 - 2	金屬腐蝕示意圖 .....	10
圖 2 - 3	計算腐蝕深度示意圖 .....	11
圖 2 - 4	Tafel 斜率的決定 .....	13
圖 2 - 5	直流極化法 .....	13
圖 2 - 6	交流阻抗法之(a)等效電路圖；(b)總阻抗之複 數平面圖( $Z'$ 為實部軸， $Z''$ 為虛部軸) .....	14
圖 2 - 7	金屬表面帶有保護層之交流阻抗示意圖 .....	14
圖 2 - 8	脈衝腐蝕量測原理 .....	16
圖 2 - 9	Galva Pulse 電位與時間關係 .....	17
圖 2 - 10	GalvaPulse 顯示畫面 .....	17
圖 2 - 11	GalvaPulse 顯示畫面 .....	17
圖 2 - 12	主筋與箍筋腐蝕情形 .....	19
圖 2 - 13	箍筋腐蝕情形(腐蝕率 35 %) .....	19
圖 2 - 14	試體箍筋腐蝕裂縫發展 .....	19
圖 2 - 15	試體主筋腐蝕狀況 .....	20
圖 2 - 16	單側試體主筋腐蝕裂縫發展 .....	20
圖 2 - 17	鋼筋與腐蝕生成物的體積比 .....	21
圖 2 - 18	鋼筋腐蝕膨脹應力作用示意圖 .....	21
圖 2 - 19	RC 結構物之裂縫-鋼筋腐蝕-裂縫循環示意圖 .....	22
圖 2 - 20	試體加速腐蝕圖：(a)腐蝕示意圖；(b)實際腐蝕 .....	23
圖 3 - 1	主要試驗用材料：(a) 台鹽高級精鹽；(b) 飽和 氯化鉀溶液及浸泡在 KCl 之電極；(c)紅銅網； (d)白金鈦網 .....	27
圖 3 - 2	數位直流電源供應器 .....	28
圖 3 - 3	GalvaPulse 腐蝕量測儀 .....	29

圖 3 - 4	VersaSTAT 恆電位恆電流儀.....	30
圖 3 - 5	小尺寸試體設計(保護層厚度的影響) .....	31
圖 3 - 6	小尺寸試體設計(鋼筋配置的影響) .....	32
圖 3 - 7	試體模具 .....	32
圖 3 - 8	試體通電過程 .....	36
圖 3 - 9	利用 Galvapulse 進行量測 .....	36
圖 3 - 10	試體中的腐蝕鋼筋 .....	37
圖 3 - 11	含交疊鋼筋試體 .....	37
圖 3 - 12	計算腐蝕量與重量損失的關係(先期試驗).....	39
圖 3 - 13	不同通電齡期下的試體與內埋鋼筋：(a) 5 天 通電齡期試體；(b) 7 天通電齡期試體；(c) 9 天通電齡期試體；(d) 5 天試體取出之鋼筋；(e) 7 天試體取出之鋼筋；(f) 9 天試體取出之鋼筋 .....	39
圖 3 - 14	不同保護層厚度下計算腐蝕量與重量損失間 的關係((a)脈衝量測法；(b)直流極化法，水灰 比 0.6) .....	42
圖 3 - 15	保護層厚度 3 cm 的試體與取出鋼筋過程：(a) 5 天通電齡期試體；(b) 7 天通電齡期試體；(c) 9 天通電齡期試體；(d) 5 天試體取出鋼筋過程； (e) 7 天試體取出鋼筋過程；(f) 9 天試體取出鋼 筋過程.....	43
圖 3 - 16	保護層厚度 9 cm 的試體與取出鋼筋過程：(a) 5 天通電齡期試體；(b) 7 天通電齡期試體；(c) 9 天通電齡期試體；(d) 5 天試體取鋼筋過程； (e) 7 天試體取鋼筋過程；(f) 9 天試體取鋼筋過 程.....	44

- 圖 3 - 17 不同水灰比下計算腐蝕量與重量損失間的關係((a)w/c=0.4；(b)w/c=0.5；(c)w/c=0.6，保護層：6 cm) ..... 48
- 圖 3 - 18 不同水灰比下計算腐蝕量與重量損失間的關係(脈衝腐蝕量測法，保護層厚度：6 cm) ..... 48
- 圖 3 - 19 水灰比 0.4 的試體與取出鋼筋過程：(a) 3 天通電齡期試體；(b) 5 天通電齡期試體；(c) 7 天通電齡期試體；(d) 3 天試體取出之鋼筋；(e) 5 天試體取出之鋼筋；(f) 7 天試體取出之鋼筋 ..... 49
- 圖 3 - 20 水灰比 0.5 的試體與取出鋼筋過程：(a) 3 天通電齡期試體；(b) 5 天通電齡期試體；(c) 7 天通電齡期試體；(d) 3 天試體取出之鋼筋；(e) 5 天試體取出之鋼筋；(f) 7 天試體取出之鋼筋 ..... 50
- 圖 3 - 21 不同保護層厚度下水灰比 0.4 試體之計算腐蝕量與重量損失間的關係 ..... 51
- 圖 3 - 22 不同粗細粒料體積下計算腐蝕量與重量損失間的關係(w/c=0.6，保護層：6 cm) ..... 54
- 圖 3 - 23 含水率與乾燥時間的關係(水灰比 0.6、保護層 6 cm) ..... 55
- 圖 3 - 24 重量損失率與乾燥時間的關係(水灰比 0.6、保護層 6 cm) ..... 56
- 圖 3 - 25 腐蝕電流密度與含水率的關係(水灰比 0.6、保護層 6 cm、加速通電時間 5 天) ..... 56
- 圖 3 - 26 橫向鋼筋存在下計算腐蝕量與重量損失間的關係(水灰比：0.6、主筋保護層厚度：6 cm) ..... 58
- 圖 3 - 27 水灰比 0.5 的含交錯鋼筋試體與取出鋼筋過程：(a) 3 天通電齡期試體；(b) 5 天通電齡期試體；(c) 7 天通電齡期試體；(d) 3 天試體鋼筋取出過程；(e) 5 天試體鋼筋取出過程；(f) 7

	天試體鋼筋取出過程；(g) 3 天試體取出之鋼筋；	
	(h) 5 天試體取出之鋼筋；(i) 7 天試體取出之鋼筋.....	59
圖 3 - 28	不同通電時間下腐蝕電流密度與脈衝時間的關係(脈衝電流:100 $\mu$ A, w/c=0.6, 保護層 6 cm)	
	.....	62
圖 3 - 29	不同通電時間下腐蝕電流密度與脈衝電流的關係(脈衝時間:10 s, w/c=0.6, 保護層 6 cm) .....	62
圖 3 - 30	不同通電時間下腐蝕電流密度與過電位的關係(量測間隔時間:30 s, w/c=0.6, 保護層 6 cm)	
	.....	65
圖 3 - 31	不同通電時間下腐蝕電流密度與量測間隔時間的關係(過電壓: $\pm 10$ mV, w/c=0.6, 保護層 6 cm) .....	65
圖 3 - 32	不同保護層厚度、箍筋存在、粗細粒料體積比下砂漿中氯離子含量與鋼筋腐蝕量間的關係 (w/c=0.6).....	67
圖 4 - 1	腐蝕足尺寸梁試體設計圖 .....	70
圖 4 - 2	腐蝕用儀器工具：(a) 台鹽高級精鹽；(b)飽和氯化鉀溶液；(c) 銅板；(d)電源供應器 .....	74
圖 4 - 3	試體製作過程：(a)綁紮情況與模板設置；(b)混凝土流度試驗；(c)試體灌漿；(d)振動棒搗實；(e)試體灌漿完成；(f)圓柱抗壓試體灌漿完成；(g)養護試體.....	76
圖 4 - 4	足尺寸加速腐蝕試驗設置示意圖：(a)側視圖；(b)上視圖 .....	77
圖 4 - 5	加速腐蝕試體實際通電設置 .....	77
圖 4 - 6	量測點位說明 .....	78
圖 4 - 7	I 柱 A 鋼筋的腐蝕速率變化.....	83

圖 4 - 8	I 柱 B 鋼筋的腐蝕速率變化.....	83
圖 4 - 9	I 柱 C 鋼筋的腐蝕速率變化.....	83
圖 4 - 10	I 柱 D 鋼筋的腐蝕速率變化.....	83
圖 4 - 11	I 柱 E 鋼筋的腐蝕速率變化.....	84
圖 4 - 12	I 柱 F 鋼筋的腐蝕速率變化.....	84
圖 4 - 13	I 柱 G 鋼筋的腐蝕速率變化.....	84
圖 4 - 14	I 柱 H 鋼筋的腐蝕速率變化.....	84
圖 4 - 15	II 柱 A 鋼筋的腐蝕速率變化.....	88
圖 4 - 16	II 柱 B 鋼筋的腐蝕速率變化.....	88
圖 4 - 17	II 柱 C 鋼筋的腐蝕速率變化.....	88
圖 4 - 18	II 柱 D 鋼筋的腐蝕速率變化.....	88
圖 4 - 19	II 柱 E 鋼筋的腐蝕速率變化.....	88
圖 4 - 20	II 柱 F 鋼筋的腐蝕速率變化.....	88
圖 4 - 21	II 柱 G 鋼筋的腐蝕速率變化.....	89
圖 4 - 22	II 柱 H 鋼筋的腐蝕速率變化.....	89
圖 4 - 23	III 柱 A 鋼筋的腐蝕速率變化.....	93
圖 4 - 24	III 柱 B 鋼筋的腐蝕速率變化.....	93
圖 4 - 25	III 柱 C 鋼筋的腐蝕速率變化.....	94
圖 4 - 26	III 柱 D 鋼筋的腐蝕速率變化.....	94
圖 4 - 27	III 柱 E 鋼筋的腐蝕速率變化.....	94
圖 4 - 28	III 柱 F 鋼筋的腐蝕速率變化.....	94
圖 4 - 29	III 柱 G 鋼筋的腐蝕速率變化.....	94
圖 4 - 30	III 柱 H 鋼筋的腐蝕速率變化.....	94
圖 4 - 31	貼磚試體製作：(a)量尺寸現場放樣；(b)磚表面清潔；(c)貼覆磁磚情形；(d)磁磚貼覆完成示意.....	97
圖 4 - 32	貼磚足尺寸試體計算腐蝕量及重量損失之關係.....	103

圖 4 - 33	貼磚足尺寸試體計算腐蝕量及重量損失之關係.....	107
圖 4 - 34	通電七天後之貼磚足尺寸試體.....	108
圖 4 - 35	貼磚足尺寸試體敲除混凝土後的腐蝕形態.....	109
圖 4 - 36	均勻腐蝕.....	109
圖 4 - 37	將鏽蝕刷除後之鋼筋：(a) I 柱主筋；(b) II 柱主筋；(c) I 柱箍筋；(d) II 柱箍筋.....	110
圖 5 - 1	腐蝕量測點位說明.....	116
圖 5 - 2	脈衝腐蝕量測儀的架設.....	116
圖 5 - 3	脈衝電位與時間關係.....	116

## 摘要

關鍵詞：混凝土、鋼筋腐蝕、量測技術

### 一、研究緣起

目前土木工程的營建材料中，以鋼筋混凝土最為廣泛使用，然而裂縫的產生普遍存在於鋼筋混凝土結構物，加上環境的有害因子，如二氧化碳及鹽分，直接或間接促成鋼筋鏽蝕，進而降低結構物的性能。文獻研究發現，不僅是鋼筋的腐蝕程度，腐蝕的位置、長度、主筋或箍筋鏽蝕等因子皆影響鋼筋混凝土的韌性行為。然而，現地常用的 ASTM C876 腐蝕電位量測法並不能準確反應鋼筋腐蝕的位置與程度，既有的非破壞性腐蝕電流量測法與重量損失量測的結果間亦存在相當的差異，國內文獻卻對此問題並無深入探討亦無相關量測規範。

本研究探討影響鋼筋腐蝕量測的因子、量測值可靠度分析、提升量測值準確度之方式，亦期望在現地量測上能更加方便使用，有助於未來相關量測規範之制訂，與新建/既有建築物的生命週期評估之發展。

### 二、研究方法及過程

本研究同時製作小尺寸試體以及腐蝕鋼筋柱構件設計之腐蝕觀察試體，兩種試體承受相同的加速腐蝕條件，前者改變材料因子以及量測因子後進行測試，以觀察腐蝕劣化行為，各因子包括水灰比、鋼筋配置、保護層厚度等，後者用以觀察實際鋼筋混凝土中鋼筋之腐蝕型態，例如主鋼筋及箍筋重量損失率、局部鏽蝕等探討等。因構件腐蝕位置為本研究之變數，故變化不同的試體尺寸設計，包括主、箍筋交錯或非交錯兩者行為討論。腐蝕的方式採鋼筋通電加速腐蝕。過程中，利用恆電位恆電流儀、脈衝腐蝕量測儀等量測鋼筋的腐蝕電位、腐蝕電流密度，再進一步將腐蝕電流密度換算得腐蝕速率。最後利用腐蝕速率與經過的時間的關係，經積分後可得計算鋼筋腐蝕，再與實際重量損失相較。

### 三、重要發現

本研究探討以電化學法量測鋼筋混凝土中鋼筋腐蝕的技術及其影響因子，根據試驗結果，重要的發現整理如下：

- (1) 鋼筋腐蝕量可由腐蝕速率對時間積分估算，然而此估算值低於實際重量損失。其中，脈衝電流量測法的試驗結果比直流極化法較接近實際重量損失。
- (2) 腐蝕量測值受保護層的性質所影響，尤其以水灰比的影響最大。當保護層 6 cm 以內且水灰比 0.5 以上時，計算腐蝕量與重量損失量兩者間約成正比，可利用計算腐蝕量乘上一係數合理估算重量損失。
- (3) 計算腐蝕量與重量損失量間的正比關係亦受到保護層粒料體積比的影響。當保護層為混凝土時的係數較小，亦即其計算腐蝕量較砂漿保護層更接近真實重量損失。
- (4) 就足尺寸試體而言，運用脈衝腐蝕量測法可有效量測鋼筋混凝土內隨時間變化的鋼筋腐蝕速率，其係數約在 10 以內，箍筋的存在並不明顯影響最後的腐蝕量估算。

### 四、主要建議事項

根據研究成果提出以下具體建議，分別以立即可行建議及長期性建議加以列舉。

#### 建議一

立即可行之建議—研擬鋼筋混凝土中鋼筋腐蝕速率量測標準

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、經濟部標準檢驗局、中華民國土木技師公會全國聯合會

目前應用於混凝土中鋼筋腐蝕量測的方法主要依照 ASTM C876 量測腐蝕電位，然而電位僅能提供腐蝕趨勢並無法判斷腐蝕速率，與實際鋼筋腐蝕情形相較，亦往往存在相當大的差異，故有必要新制定量測鋼筋腐蝕速率的標準。

就本研究所使用的脈衝電流法而言，所使用的理論已發展多年，相關儀器已有多家廠商生產，實務上現地亦已應用，國外已有相關技術文章發表，再加上本研究的成果說明該量測法可行，故目前可嘗試草擬相關量測國家標準。

## 建議二

長期性建議－進行腐蝕速率推估腐蝕量的研究

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部建築研究所、中華民國土木技師公會全國聯合會

本研究的結果雖然說明腐蝕速率能夠推估腐蝕量，但亦發現其間仍有許多不確定性。為更切合實務需求，宜再進行現地試驗、蒐集資料，更進一步建立合理的分析方式。可藉由表面未披覆的公共工程結構物的量測開始，研擬改善的量測方法及推估模式，再嘗試運用於一般建築。

## 建議三

長期性建議－特殊鋼筋混凝土構造物中的鋼筋腐蝕量測研究

主辦機關：交通部運輸研究所

協辦機關：內政部建築研究所、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國大地工程技師公會

本研究中所使用之量測技術適用於量測混凝土中鋼筋的腐蝕，除了運用於一般建築結構物外，未來應可嘗試使用於其它特殊鋼筋混凝土構造物，如擋土牆、岩錨等大地工程中鋼筋混凝土結構物的量測。此外，根據儀器原理與說明，該技術亦可適用於量測水中鋼筋混凝土的腐蝕，故未來可用於港灣鋼筋混凝土結構物的腐蝕監測。然而，前述各項應用目前文獻闕如，亦少見現地量測範例，雖具實務應用的潛力，但仍需後續大量研究以驗證。

## ABSTRACT

Keywords: concrete, reinforcement corrosion, measurement technique

The reinforced concrete is one of the most popular construction materials nowadays. Due to the presence of cracks, detrimental environmental factors, such as carbonation and salt attack, directly or indirectly induced the reinforcement corrosion and reduced the performance of the structure. The ductility of the reinforced concrete was found to be related with the amount, location, and length of corrosion, etc. However, ASTM C876, the standard commonly used on-site, only measures the corrosion potentials, which cannot accurately indicate the locations and the amounts of corrosion. In addition, the existing nondestructive measurement methods for the corrosion currents always show great discrepancies from the weight loss. Such issues are not well discussed in literature and there is no other standard for measuring the reinforcement corrosion in concrete.

The factors influencing the reinforcement corrosion measurements, reliabilities of the measurements, and the ways to improve the accuracy of the measurements will be discussed in this project. It is hoped that the results of this study are helpful for future on-site application, revision of current measuring standards, and evaluation for the life cycle of new or existing reinforced concrete structures.

In this study, both the reduced-sized and full-scaled specimens are prepared. Both specimens are subjected to the similar corrosion conditions. The reduced-sized one is used to explore the effects of the materials and measuring factors, including the w/c, reinforcement allocations, cover thickness, and etc. The full-scaled ones are intended to explore the features of the onsite corrosion, including the weight losses and corrosion locations of the reinforcements. The external current is applied to the specimens for accelerated corrosion, and then the corrosion potential and current densities of the reinforcements are measured by a potentiostat/galvanostat or a galvanopulse device. The current densities are then converted to corrosion rates, which are further integrated by time to get the amount of corrosion. Finally, the weight loss is to be compared with that calculated corrosion.

The results of this study are summarized as follows:

1. The amount of reinforcement corrosion can be evaluated through the integration of the corrosion rate by time. However, the calculated corrosion underestimates the actual weight loss. In addition, the galvanopulse method provides results more reliable than the linear polarization.

2. The calculated corrosion is influenced by the cover properties, of which the w/c influences the most. The calculated corrosion is linearly proportional to the weight loss as the cover depth is less than 6 cm and the w/c is higher than 0.5, meaning that the actual weight loss can be reasonably estimated by the calculated corrosion.

3. The ratio between the weight loss and the calculated corrosion is also influenced by the aggregates ratio. Such ratio is small for concrete cover, suggesting that the corrosion estimation in concrete is more accurate than in mortar.

4. In full-scaled reinforced concrete specimens, the galvanopulse method effectively measures the corrosion rate varying with time. The ratio between the weight loss and the calculated corrosion is within 10. It appears that the presence of the stirrups do not greatly influence the calculated corrosion.

The strategies on improving the measurement techniques of the reinforcement corrosion are proposed.

In the short term, it is necessary to propose a new standard to regulate the measurements on the reinforcement corrosion rates. The ASTM C876 only provides a way to measure the corrosion potential, which is always not consistent with the corrosion observations. On the other hand, the results in this study have shown that the galvanopulse method is applicable to determine the corrosion rates of the reinforcements. Moreover, theoretical backgrounds of the technique have been developed for years, more and more instrument companies produce the associated measuring devices, and onsite measurements using such technique are now popular. Therefore, it is the time to draft a measuring standard based on the galvanopulse technique.

In the long term, it is necessary to continue the research on relating the corrosion rate to the amount of the corrosion.

Results in this study showed that the amount of corrosion can be evaluated by the corrosion rates. However, such calculated corrosion is not consistent with weight loss. The influencing factors are to be further studied. In addition, onsite measurements are encouraged so that the relationship model can be better revised.

Another possible direction of future study is the reinforcement corrosion in special reinforced concrete structures, such as retaining walls and rock anchor in geotechnical engineering. In addition, according to the theoretical background and the manual of the device, the galvanopulse technique can be applied to the reinforcement corrosion measurement of the underwater structures. Therefore, it is possible to monitor the reinforcement corrosion of the harbor structures using such technique in the future. However, even though it has great potentials for on-site applications, there is so far little examples documented in literature. Further researches are required.

## 第一章 緒論

### 第一節 研究緣起與背景

#### 壹、研究緣起

目前土木工程界所使用的營建材料中，以鋼筋混凝土最為廣泛，然而裂縫普遍存在於鋼筋混凝土結構物，加上週遭環境的有害因子，如二氧化碳及鹽分，往往直接或間接促成鋼筋鏽蝕(如圖 1-1 所示)，進而降低結構物的性能。文獻研究發現，不僅鋼筋的腐蝕程度，其它包括腐蝕位置、長度、主筋或箍筋鏽蝕等因子皆影響鋼筋混凝土的韌性行為，但現地所常用的 ASTM C876 腐蝕電位量測法卻不能準確反應鋼筋腐蝕的位置與程度，僅能大約提供鋼筋腐蝕的機率。此外，既有的非破壞性腐蝕電流量測法與重量損失法所量測的結果間亦存在相當的差異，國內文獻卻對此問題並無深入探討亦無制定完整的相關量測規範。

本研究探討影響鋼筋腐蝕量測的因子、量測值可靠度分析、提升量測值準確度之方式，亦期望在現地量測上能更加方便使用，有助於未來相關量測規範之制訂與新建/既有建築物的生命週期評估之發展。

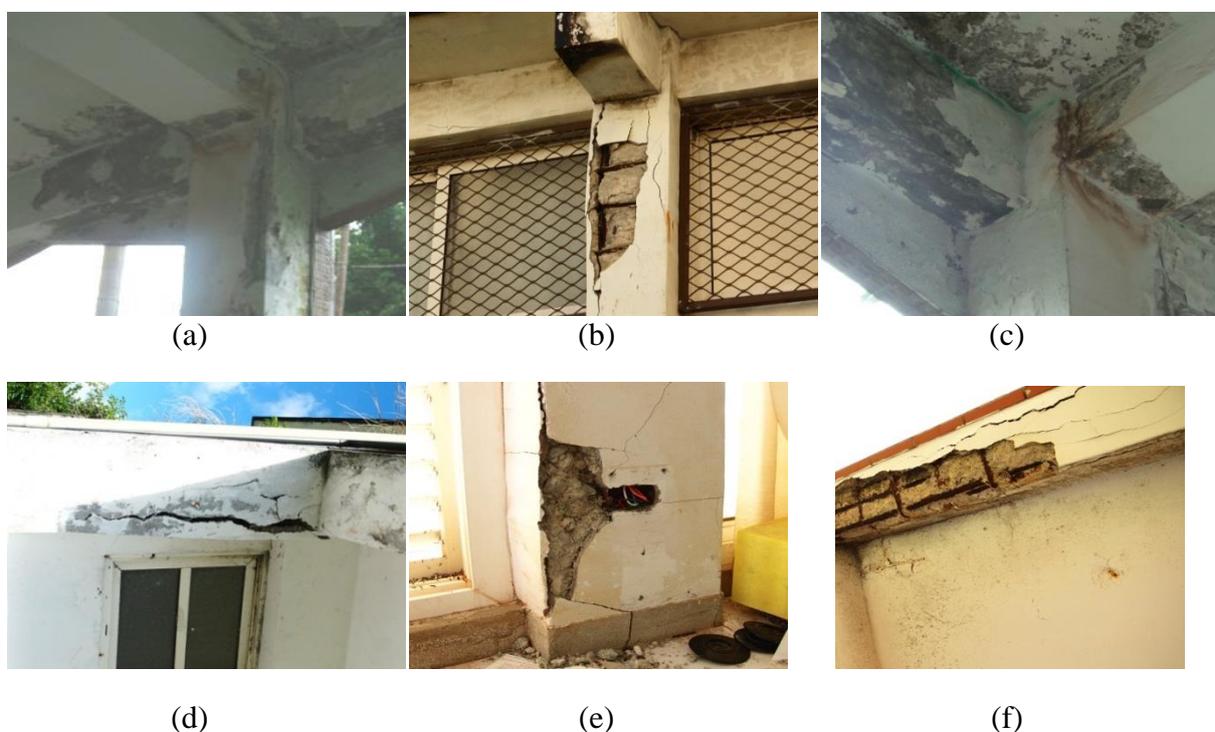


圖 1-1 老舊校舍腐蝕構件照片  
(資料來源：本研究繪製)

## 貳、研究背景

鋼筋混凝土為當今土木工程不可或缺的材料，然而隨著環境變遷、工業污染、施工不良、使用不當等因素，鋼筋混凝土構件的耐久性逐漸為吾人所重視，尤其當混凝土發生劣化現象時，往往伴隨著內部鋼筋的腐蝕，進而影響結構物的安全，減少使用壽命。然而，鋼筋混凝土因鋼筋腐蝕所造成的劣化往往必須耗費大量的社會資源維修補強。有鑑於此，如何發展量測構件中鋼筋腐蝕位置及腐蝕量的技術刻不容緩，有助於進一步評估鋼筋腐蝕後的力學或耐震性能折減，擬定適當的維修補強策略。

本研究團隊近年從事混凝土耐久性能與鋼筋腐蝕量測相關研究，經驗顯示，混凝土劣化與鋼筋腐蝕不全然具正相關性，亦即藉由表面混凝土的劣化不可完全推估鋼筋的腐蝕速率，尤其當混凝土裂縫產生時，有害離子藉此進入，往往鋼筋腐蝕程度較預期高。因此，如何正確直接且正確量測鋼筋腐蝕為重要課題。另一方面，目前現地的腐蝕量測法多為腐蝕電位與腐蝕電流量測，前者僅能推估腐蝕的機率，後者可推算鋼筋腐蝕的速率。然而，腐蝕機率不代表腐蝕必然發生及腐蝕的速率且隨時變化。此外，鋼筋混凝土構件性能評估中，鋼筋斷面的折減是重要的參數，如何以腐蝕速率推算腐蝕量亦是重要課題。過去本研究團隊的研究發現，利用不同時間下所測得之腐蝕速率對時間積分可得計算腐蝕量，雖然該計算腐蝕量與實際重量損失成正比，但其係數關係似受到許多因素所影響，如箍筋或主筋、保護層厚度等，故實務應用上仍不足以推算正確的腐蝕量。另一方面，實務上發現箍筋與主筋交錯地方的腐蝕程度常較周邊高，而腐蝕量測於此區域往往無法進行，量測數值不穩定。另一常見的問題為鋼筋混凝土建築物的表面披覆以磁磚或塗漆居多，但目前的電化學量測法必須與鋼筋間形成通路，故尚無有效的量測法。以上問題於本研究中探討，未來可根據本研究的成果找出有效的量測技術及分析方法。

此外，內政部建築研究所自 98 年度起陸續進行鋼筋混凝土構件中鋼筋腐蝕對其耐震性能與生命週期影響之相關研究。結果顯示，不論箍筋或主筋腐蝕皆會降低鋼筋混凝土的耐震性能。基於試驗結果，目前已建立剩餘剪力與韌性評估法，亦已建立有限元素分析模型。然而，於實務應用上時，亦將遇到前述之問題，如何求其鋼筋腐蝕量進而推算鋼筋斷面折減是一課題。若能釐清鋼筋腐蝕量測的相關問題，則可結合前述計畫的成果，建立完整的鋼筋混凝土構件評估系統。未來於現地使用時，即可根據所估算的鋼筋腐蝕量，導入理論預測模型，進而評估鋼筋混凝土構件的耐震性能折減。

### 參、預期目標

1. 探討腐蝕量測值與保護層厚度、保護層含水量、保護層配比間的關係及評估各因子的影響性。腐蝕量測包括腐蝕電位、腐蝕電流密度及重量損失量等。
2. 探討腐蝕量測參數對於腐蝕量測的影響，包括外加電位及時間等。
3. 探討鋼筋混凝土表面磁磚披覆下鋼筋的腐蝕行為及其量測方法等。
4. 提出提高腐蝕量測精確度之建議方法。
5. 研擬現地腐蝕量測的標準步驟。

## 第二節 研究目的與重要性

### 壹、研究目的

本研究鑑於以上鋼筋腐蝕量測等問題，期能藉由多項小尺寸與全尺寸試體試驗，達到以下目標：

- (1). 探討影響鋼筋腐蝕量測的因子。其中，材料因子包括保護層厚度、保護層含水量、與保護層配比、磁磚披覆等。量測因子包括外加電位及時間等。
- (2). 比較不同的電化學量測法，包括以直流極化、交流阻抗法、脈衝電流法量測腐蝕電流密度等。
- (3). 建立預測腐蝕量的方式。利用腐蝕電流密度，計算腐蝕速率，進而推算腐蝕量。
- (4). 提出鋼筋腐蝕量測的步驟。基於探討影響因子的成果，建立適合現地量測的步驟，期能獲得具重覆性與穩定性的量測值。

### 貳、本研究之重要性

隨著環境變遷、工業污染，以及材料使用不當等因素，使得混凝土結構物的耐久性倍受考驗。由國外的經驗可以瞭解，鋼筋混凝土因鋼筋腐蝕造成的劣化往往耗費極大的社會資源維修補強。國內經過近幾十年來的經濟發展，不少重要建設及建築均於上世紀完成，時至今日，不少建築物的老劣化問題逐漸浮現。有鑒於此，如何有效量測建築構件中鋼筋的腐蝕位置與腐蝕量，進而評估鋼筋腐蝕後之改善方法，不僅對於鋼筋混凝土構件設計與補強具重要意義，也是處於地震帶並具島型氣候之台灣所不容忽視的問題。本研究就短期而言，成果將有助於提升量測技術與精確度，長期而言，藉由性能評估則可掌握結構物的生命週期各階段。

### 第三節 研究方法與步驟

本研究製作小尺寸試體，以及腐蝕鋼筋柱構件設計之腐蝕觀察試體，兩種試體受相同的加速腐蝕條件，前者設計材料因子以及量測因子進行測試，以觀察腐蝕劣化行為，各因子例如水灰比、鋼筋配置、保護層厚度等；後者用以觀察實際鋼筋混凝土中鋼筋之腐蝕型態，例如主鋼筋及箍筋重量損失率、局部鏽蝕等探討。腐蝕的方式採鋼筋通電加速腐蝕，因構件腐蝕位置為本研究之變數，故變化不同的試體尺寸設計，包括主、箍筋交錯或非交錯兩者行為討論，詳細試驗方式及腐蝕位置於第三章詳述。

小尺寸試體製作中，依試驗參數調整配比及模具後拌合，於水中養護 28 天，取出後以環氧樹脂塗封，最後再浸置於含鹽水的水槽通電加速腐蝕。試體通電後，每隔一天自水槽取出。之後，利用恆電位恆電流儀、脈衝腐蝕量測儀等量測鋼筋的腐蝕電位、腐蝕電流密度，再進一步將腐蝕電流密度換算得腐蝕速率。以上過程重覆直至試體鏽水逸出，此時再將試體破壞，取出鋼筋稱重即可得真正的鋼筋腐蝕量。就交疊鋼筋試體而言，以通電腐蝕模擬主筋與箍筋同時腐蝕，以求更接近現地狀況，亦即主筋與箍筋皆腐蝕但腐蝕程度不同。對於該試體，本研究嘗試量測主筋的腐蝕電流密度，最後再與重量損失法的結果相較。

如同小尺寸試體試驗，足尺寸試體試驗中，於試體表面繪製網格以標示鋼筋位置後，浸置於含鹽水水槽中通電加速腐蝕，之後每通電一天後利用脈衝腐蝕量測儀量測各網格之腐蝕速率，直到鏽水逸出後停止量測。此時，破壞試體並取出腐蝕鋼筋稱重，即可求得鋼筋腐蝕量。另一方面，利用腐蝕速率與經過的時間的關係，經積分後可得計算鋼筋腐蝕量，該計算腐蝕量與重量損失法所得之腐蝕量約成正比，兩者間的相關性應可由小試體試驗的結果推得。

本研究報告就小尺寸試體試驗與足尺寸構件試體試驗兩大項目，分別進行文獻回顧以及研究成果說明，所使用之研究方法與步驟如圖 1-2 所示。

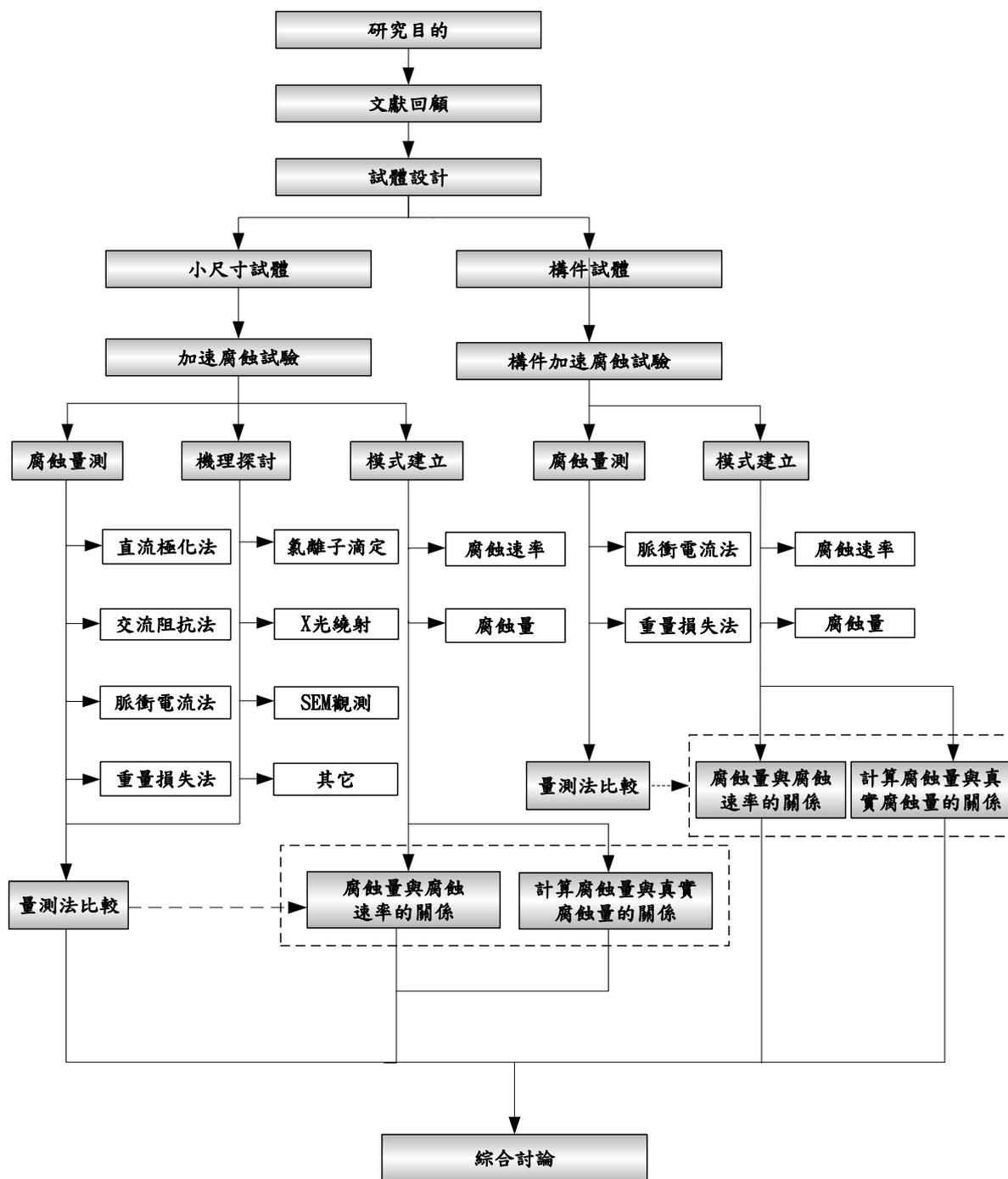


圖 1-2 研究方法與相互關係  
(資料來源：本研究繪製)



## 第二章 文獻回顧

### 第一節 前言

近年來，越來越多的研究探討鋼筋腐蝕所引起的結構性能損害，鋼筋腐蝕往往是鋼筋混凝土構造物較嚴重且常見的損害的原因之一，牽涉到技術、經濟甚至社會問題，但目前解決的方法往往耗費許多自然資源[1-2]。有鑑於此，鋼筋腐蝕的預防、監測及修補應為吾人所重視。就整個構件的生命周期而言，若能早期預防、使用中監測、掌握修補的時機則可節省許多不必要的浪費。

### 第二節 腐蝕機理

混凝土內埋鋼筋主要因兩種機制而達到保護鋼筋避免腐蝕，包括物理性與化學性[3-4]。就物理性機制而言，混凝土阻擋外界有害離子的進入。就化學性機制而言，混凝土中的孔隙水溶液呈高鹼性環境(pH=12-14)，有助於鋼筋表面形成鈍態膜，保護鋼筋不受有害因子的侵入，進而提供結構物的耐久性，避免鋼筋進一步腐蝕。如同多數金屬，鐵會以氧化後之穩定形態存在於自然界之中，為了要達到穩定的平衡狀態，此時會釋放出電子並與其它元素形成能量較低且穩定的化合物，如此才能存在於自然界之中，所以腐蝕是金屬與周圍環境產生電化學反應而造成破壞的一種情況。此外，腐蝕作用是否會進行，還需要下列五大條件，陽極、陰極、導電通路、電流及電解溶液等，缺一不可：

#### (1) 陽極

電化學反應中，電極板上進行著電荷轉移的現象，其中陽極是氧化反應的地方，金屬放出電子而形成離子的狀態，其化學反應式為：



#### (2) 陰極

陰極則是發生水的還原反應，在基性溶液中水吸收游離電子而形成氫氧根離子，其化學反應式為：

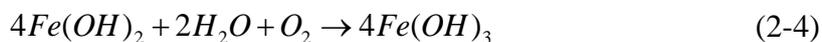
以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究



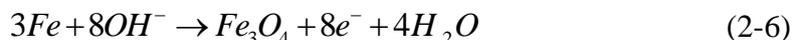
陽極、陰極反應中所生成的鐵離子和氫氧根離子(OH<sup>-</sup>)可結合成氫氧化亞鐵(沉澱作用)：



此時氫氧化亞鐵可與水中的氧作用生成氫氧化鐵(氧化作用)：



上式中的產物  $FeO(OH)$  即為紅鏽，若於鹼性溶液中，則可形成另一種氧化物：



上式中的產物  $Fe_3O_4$  即為黑鏽。

### 3. 導電通路：

電化學反應中的氧化或還原反應均需要有電子轉移，所以必須有良好的導電通路腐蝕反應才能順利的發生。在導電性不佳的通路中，其腐蝕反應將隨之減緩且不易進行。

### 4. 電流：

腐蝕行為的發生必須要有足夠數量的電子才能使離子化反應順利的進行，也就是要有足夠的電動勢才能驅動電子間的流動形成電流，氧化或還原反應才會順利進行。

## 5. 電解溶液：

電化學腐蝕又稱為濕腐蝕，必須要在潮濕的環境下或是水氣足夠的環境下氧化還原才會順利進行。在潮濕的環境下，離子的移動速率遠比金屬氧化擴散作用來的快，故腐蝕的速率將會變快，在無濕氣的環境下，則離子將會停止移動。

上述五種條件構成一個系統，可定義為電化學電池，又稱為「半電池」，陽極與陰極兩者間藉著導電通路及電解溶液連接成電流迴路。兩種金屬中較活潑的一個作為陽極，腐蝕的速度加快，而較不活潑的金屬作為陰極，腐蝕的速度減緩。兩種金屬可以通過導線連接在一起，也可以直接相互接觸。如果僅僅將這兩種金屬浸泡在電解液中，但是並不將它們連接起來，這兩種金屬的腐蝕速度並不會加快。鋼筋本身為一導電良好的材料，所以成為此電化學腐蝕系統中的導電通路，加上混凝土孔隙溶液中所提供的游離離子，即形成相當於電化學腐蝕系統中的電解溶液，進而造成電極間腐蝕電流，導致鋼筋腐蝕生鏽，如圖 2-1 與圖 2-2 所示。

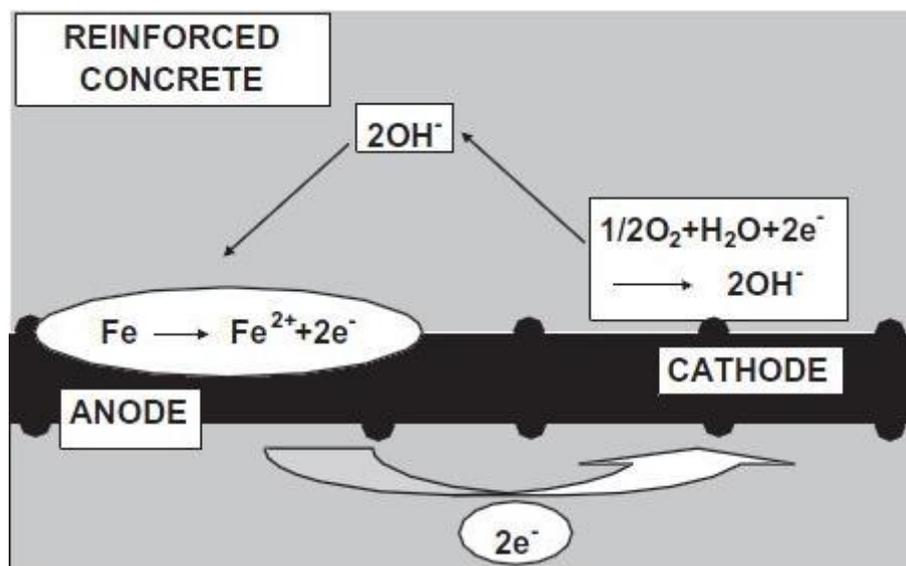


圖 2-1 鋼筋之腐蝕反應示意圖

(資料來源：R.R. Hussain and T. Ishida, [5])

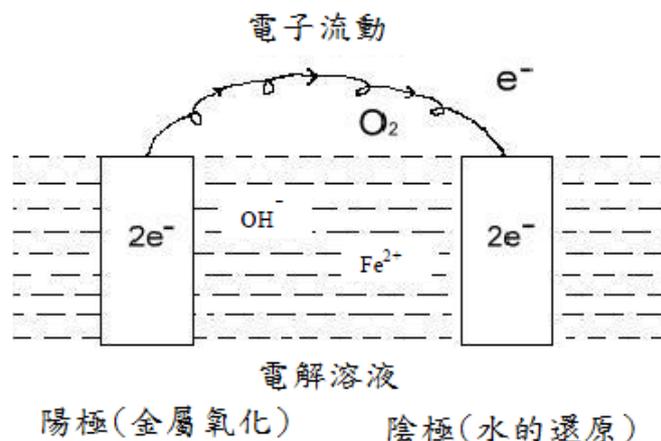


圖 2 - 2 金屬腐蝕示意圖

(資料來源：陳冠霖, [6])

### 第三節 以腐蝕速率變化推估鋼筋腐蝕量

鋼筋腐蝕量可直接用重量損失法或腐蝕速率來推求，其中重量損失法必須先破壞試體結構，將鋼筋取出後，再以化學(浸泡於強酸中)或物理性方式清除腐蝕反應之生成物並測量其重量變化，即為實際腐蝕量。

腐蝕速率推求腐蝕量的方式則是利用儀器所量測出的腐蝕電流密度計算出腐蝕速率後再推求腐蝕深度，最後再以腐蝕深度計算腐蝕量。

腐蝕速率( $r$ )的計算可利用 Faraday's Law 而得：

$$r = 0.129 \frac{a i_{\text{corr}}}{n \rho} \text{ (mpy)} = 0.00327 \frac{a i_{\text{corr}}}{n \rho} \text{ (mm/year)} \quad (2-7)$$

式中，

$i_{\text{corr}}$  = 腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$a$  = 原子量 (g/mole)

$n$  = 電子數

$\rho$  = 金屬密度 ( $7.874 \text{ g}/\text{cm}^3$ )

計算腐蝕速率後，將其對通電時間積分可求得腐蝕深度，如圖 2 - 3 所示。鋼筋腐蝕量可由腐蝕深度乘以表面積及鐵的密度求得。

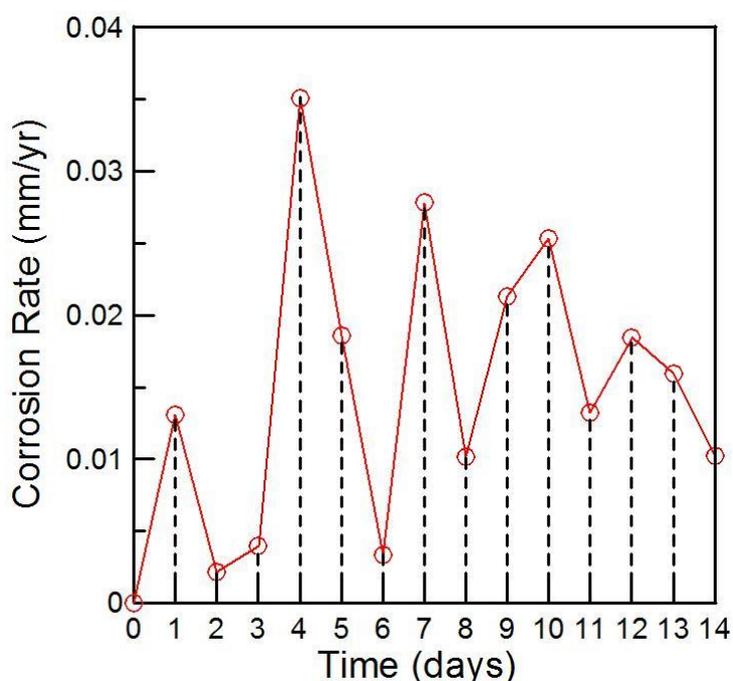


圖 2-3 計算腐蝕深度示意圖

(資料來源：林建宏等, [21])

#### 第四節 腐蝕量測法

##### 壹、腐蝕電位

鋼筋腐蝕為一電化學反應，故欲量測鋼筋的腐蝕行為，一般均使用電化學量測法。雖然重量損失法可直接量測鋼筋的腐蝕量，但曠日廢時且無法進行即時監測，故目前仍以電化學量測法為主。傳統的電化學量測法包括腐蝕電位、直流極化與交流阻抗法。腐蝕電位法只能告知腐蝕的趨勢而未能測得腐蝕速率，直流極化法在理論上和實際測量方面，一般而言均可以滿足需求[7]。另有可以更準確量測出腐蝕電流的交流阻抗法，但多運用於實驗室中，並未廣泛使用於現地。

金屬腐蝕為氧化還原反應，半電池電位量測法即是利用氧化還原過程中陽極與陰極間所產生的電位差做為評估依據，量測過程中將鋼筋視為一個半電池組，再與合適的參考電極連結構成一個完整的電池電位。參考電極通常為銀/氯化銀電極 (Ag/AgCl/KCl)、飽和甘汞電極(saturated calomel electrode, SCE)或銅/硫酸銅電極 (Cu/CuSO<sub>4</sub>)[2]。在無外加電流的作用下，此量測方法利用鋼筋與參考電極之電位差來判斷腐蝕機率，判定標準可參照 ASTM C876-09，如表 2-1 所示[8]。然而，此方法僅能判別腐蝕發生機率。由於未能測得腐蝕電流，故無法推算腐蝕速率。但也因其量測方式較為簡易，設備通常攜帶方便，故一般現地大範圍量測多使用量測半電池電位之儀器。

表 2-1 腐蝕機率判斷表

銅/硫酸銅電極(mV)	飽和乾汞電極(mV, SCE)	腐蝕機率
> -200	> -126	小於 10%
-200 ~ -350 之間	-126 ~ -276 之間	10% ~ 90%之間
< -350	< -276	大於 90%
< -500	< -426	嚴重腐蝕

(資料來源：ASTM C876-09, [8])

### 貳、直流極化法

直流極化法可分為 Tafel 斜率外推法與線性極化法，一般以待測金屬樣本如鋼筋為工作電極(陽極)(working electrode)，陰極電流則藉由輔助電極(auxiliary electrode)(通常為惰性金屬，如白金)提供定電流，再相對於參考電極量測電位差。未通電流時，參考電極顯示的是金屬的腐蝕電位。通電時，改變陰極電流可測得電位變化，再以電位相對於電流的對數繪圖。當電流很低時，圖形呈現曲線非直線，但當電流較大時，則兩者的關係成半對數直線(電位約在 50 mV 以上)，此即為 Tafel 斜線，直線延長和腐蝕電位的平行線交點即為腐蝕電流，如圖 2-4 所示。線性極化法則是在上述系統中外加一微小的過電壓(overpotential)，其所得的電流會與電壓成一線性關係，此時直線的斜率即為極化阻抗(polarization resistance,  $R_p$ )，如圖 2-5 所示[9]。該極化阻抗可藉由 Stern-Geary 方程式進一步推算腐蝕電流密度( $i_{corr}$ )[10]:

$$i_{corr} = \left[ \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \right] \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (2-8)$$

式中，

$i_{corr}$ ：腐蝕電流密度 ( $\mu A/cm^2$ )

$\beta_a$ ：陽極極化曲線斜率

$\beta_c$ ：陰極極化曲線斜率

$\Delta E$ ：電位差 (volts)

$\Delta I$ ：電流密度差 ( $A/cm^2$ )

$B$  : Stern-Geary 常數 ( $|\beta_a| = |\beta_c| = 0.1$  ,  $B \cong 0.0214$  )

由腐蝕電流密度即可再推算鋼筋腐蝕速率( $r$ ):

$$r = 0.129 \frac{ai_{corr}}{n\rho} \quad ( mpy ) = 0.00327 \frac{ai_{corr}}{n\rho} \quad ( mm/year ) \quad (2-9)$$

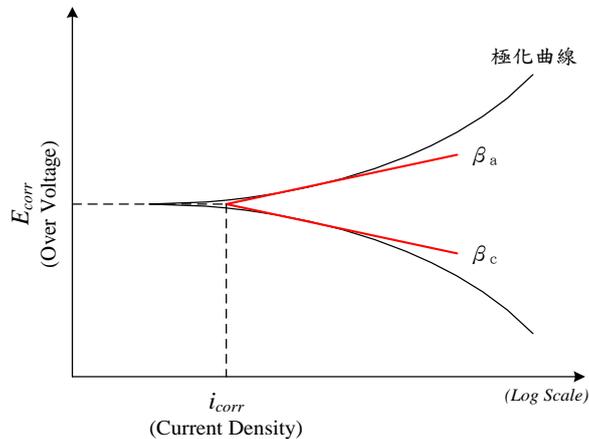


圖 2 - 4 Tafel 斜率的決定

(資料來源：葉桎銘, [25])

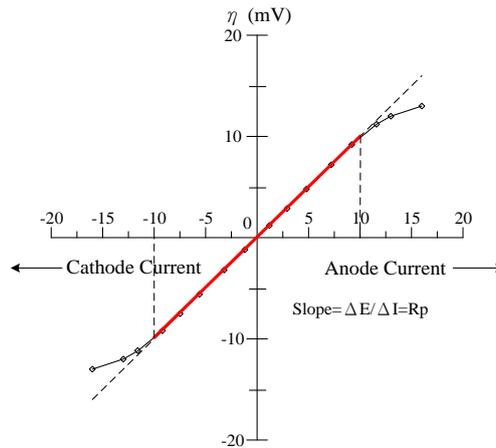


圖 2 - 5 直流極化法

(資料來源：ASTM G59-97, [9])

量測時，一般使用小於 10 mV 之微小外加電壓擾動極化，以確保其與所量測之微小電流密度成一線性關係。使用此法進行量測時，腐蝕系統必須達到穩定態，否則將會造成量測值的誤差與影響線性極化法的時效性。另外，由於直流極化法所量測之極化阻抗值包括混凝土本身、水溶液與鋼筋表面的阻抗值，故當混凝土的阻抗值很大時，其線性直流極化法所量測之阻抗值將會低估鋼筋混凝土中鋼筋的腐蝕速率，進而高估構造物的使用年限[7, 11]。

### 參、電化學阻抗分析法

電化學阻抗分析法(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)是將交流阻抗法配合上電化學分析所衍生出的方法，其利用物質氧化還原反應中得失電子的特性，將交流阻抗分析法之量測精準度加以提高[12-13]。圖 2 - 6 為交流阻抗法的示意圖[14]，由於電容之阻抗隨頻率改變，總阻抗成一半圓形之曲線[15]。待測金屬表面若有保護層，則會增加另一個阻抗值，此為 Warburg 阻抗(W)，實驗證明 W 是屬於低頻率，即圖形中轉折後的部分，如圖 2 - 7 所示[14]。交流阻抗法可量測出鋼筋與外層混凝土個別阻抗值，再代入 Stern-Geary 方程式可求得腐蝕電流，再進而推算腐蝕速率。此方法所求得之腐蝕速率較直流極化法精確，但多在實驗室中使用，較不適用於現地。

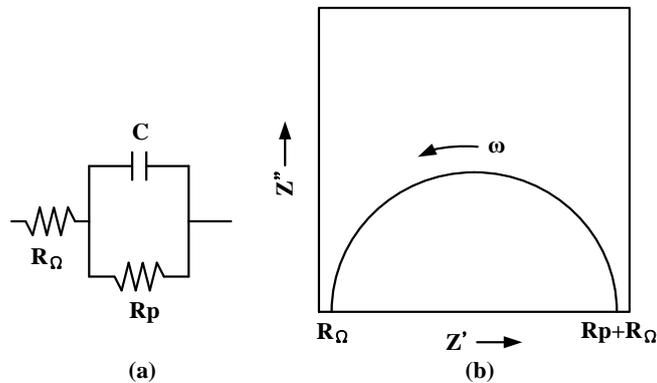


圖 2 - 6 交流阻抗法之(a)等效電路圖；(b)總阻抗之複數平面圖( $Z'$  為實部軸， $Z''$  為虛部軸)

(資料來源：Jones, D.A., [14])

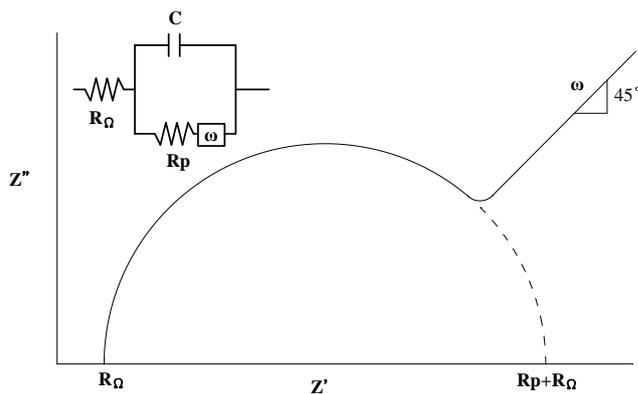


圖 2 - 7 金屬表面帶有保護層之交流阻抗示意圖

(資料來源：Jones, D.A., [14])

## 肆、恆電流脈衝法

傳統的鋼筋腐蝕量測方式多屬破壞檢測，必須破壞試樣將鋼筋取出後方可量測鋼筋損失重量，費時費力，故不適於現地即時檢測，數量多時更不易進行。近年來，多以非破壞檢測(Non-Destructive Testing, NDT)來取代傳統鋼筋腐蝕量測技術以進行腐蝕速率量測。本方法係利用非破壞極性靜電流脈衝式檢測儀器來測定混凝土內鋼筋之腐蝕速率，同時也量測保護層之半電池電位(half-cell potential)與電阻。此法利用混凝土表面計數電流探測棒及參考電極探測棒，設置的方法如圖 2-8 所示[16]。其利用脈衝原理來量測混凝土中鋼筋的腐蝕速率，同時亦可量測鋼筋之半電池電位與保護層電阻。此法施加短電流脈衝於鋼筋上以適當地極化鋼筋，再藉由鋼筋電位改變量來推算鋼筋腐蝕速率。通常電位變化如圖 2-9 所示[17]，鈍態區的初始斜率較低，活性區的斜率較高。電位變化隨著時間遞增，若是下降則為錯誤，可能是因接觸不夠所造成的。若是發生數據不穩定的情況，則可能是因為連接不當或者脈衝不足[17]。過程中，保護層表面要保持濕潤，否則表面電阻值過大易阻斷電流通路無法量測。

本研究採用丹麥 Germann Instruments 所生產之現地量測腐蝕儀器 GalvaPulse GP-5000，其利用脈衝原理來量測混凝土中鋼筋的腐蝕速率，同時亦可量測鋼筋之半電池電位與保護層電阻。如前所述，該儀器施加短電流脈衝於鋼筋上時，可由鋼筋電位的改變量來推算鋼筋腐蝕速率。儀器施加 5 秒鐘 25  $\mu\text{A}$  的電流(預設值)，正常情況下應可適當地極化鋼筋。量測值通常與試體的含水量、溫度等條件有關，一般的試驗值如表 2-2 所示[17]。除了表面電阻值會影響量測值外，保護層厚度、鋼筋相互重疊或電流通路長短皆可能影響量測值。量測時的顯示畫面如圖 2-10 及圖 2-11 所示，螢幕上第一行所顯示的是為目前的座標及狀態，第二行所顯示的是相較於氯化銀電極的腐蝕電位，儀器持續量測直到數據被讀取，第三行顯示的為其電流密度數值，第四行所顯示的是電極與鋼筋間的電阻。

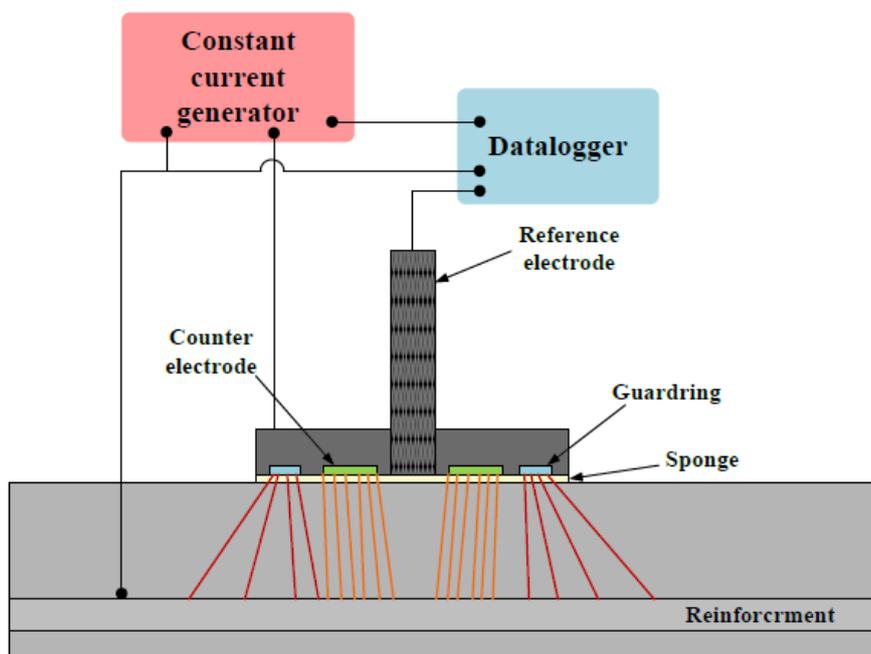


圖 2 - 8 脈衝腐蝕量測原理

(資料來源：Klinghoffer, O., [16])

表 2 - 2 Galva Pulse 一般試驗值

鏽蝕鋼筋	
實際電位 (mV)	-400 to -500
電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	5 to 20
電阻值 (kOhm)	0.2 to 4
不鏽蝕鋼筋	
實際電位 (mV)	-50 to +50
電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0.1 to 0.6
電阻值 (kOhm)	0.2 to 4

(資料來源：Germann Instruments A/S, [17])

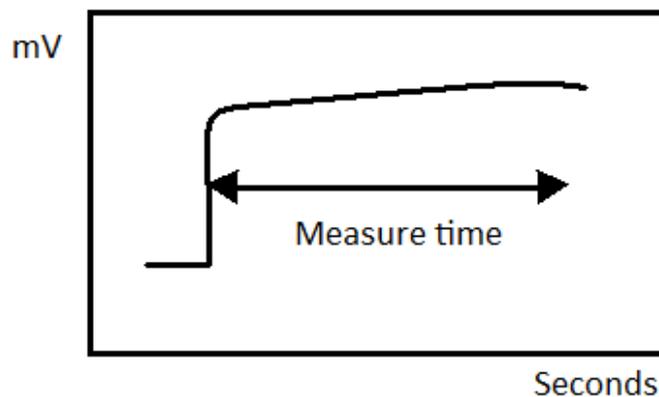


圖 2 - 9 Galva Pulse 電位與時間關係  
(資料來源：Germann Instruments A/S, [17])

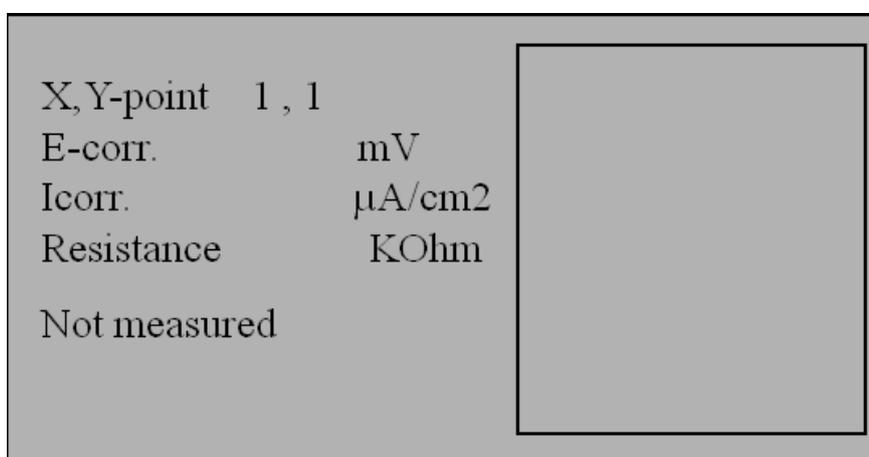


圖 2 - 10 GalvaPulse 顯示畫面  
(資料來源：Germann Instruments A/S, [17])

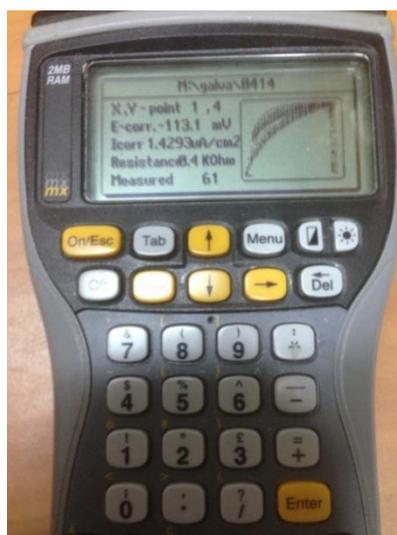


圖 2 - 11 GalvaPulse 顯示畫面  
(資料來源：本研究拍攝)

## 第五節 足尺寸構件試體試驗

### 壹、前言

內政部建築研究所自 98 年度起陸續進行鋼筋混凝土構件中鋼筋腐蝕對其耐震性能與生命週期影響之相關研究。結果顯示，不論箍筋或主筋腐蝕皆會降低鋼筋混凝土的耐震性能。鋼筋混凝土構件性能評估中，鋼筋斷面的折減是重要的參數。過去本研究團隊的經驗顯示，實務應用上仍不足以推算實尺寸正確的腐蝕量。無論在實驗室小試體進行多麼仔細的評估，推估鋼筋混凝土的腐蝕行為還是需要以結構設計為主體的試體進行，以達到最佳的評估方式。

### 貳、近年發展

過去數年，內政部建築研究所已針對足尺寸試體試驗提出數個研究案，進行了關於全尺寸鋼筋混凝土構件之腐蝕試驗，累積許多腐蝕試驗方法與鋼筋腐蝕型態觀察之經驗[18-21]。民國 98 年內政部建築研究所報告「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」指出，主筋與箍筋在相同腐蝕條件下，箍筋腐蝕程度較為嚴重且同時伴隨孔蝕之現象，如圖 2-12 所示[18]。民國 100 年內政部建築研究所報告「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」則指出，橫向鋼筋之腐蝕分布十分不均勻（縱向鋼筋有防蝕保護），常集中腐蝕於一兩處，此與現地腐蝕常只集中於一兩處類似[19]。當橫向鋼筋腐蝕率達 35 % 時，於彎折處有斷裂的情形發生，並伴隨顯著裂縫的發展，如圖 2-13 與圖 2-14 所示[19]。卓奕杉[20]於「RC 梁鋼筋腐蝕之剪力行為評估與縱向鋼筋腐蝕之耐震行為」研究中發現，一旦混凝土因腐蝕產生孔洞，將造成鋼筋局部嚴重腐蝕，產生顯著的孔蝕現象，又因其研究之試體底部並無設計保護層，故通電時縱向鋼筋底部亦有嚴重之局部腐蝕，如圖 2-15 所示[20]。民國 101 年內政部建築研究所「梁主筋腐蝕位置對桿件韌性行為的影響」[21]針對不同區域或單側鋼筋進行腐蝕的作業。結果顯示，經由防腐蝕漆塗佈及電氣絕緣膠帶纏綁後，可有效地防止鋼筋因通電所造成的腐蝕，進而控制鋼筋腐蝕區域（圖 2-16）。若於試體底部增加保護層，可有效避免卓奕杉研究發現之縱向鋼筋底部顯著腐蝕之問題。



圖 2 - 12 主筋與箍筋腐蝕情形

(資料來源：何明錦等, [18])



圖 2 - 13 箍筋腐蝕情形(腐蝕率 35 %)

(資料來源：何明錦等, [19])



圖 2 - 14 試體箍筋腐蝕裂縫發展

(資料來源：何明錦等, [19])



圖 2 - 15 試體主筋腐蝕狀況

(資料來源：卓弈杉, [20])



圖 2 - 16 單側試體主筋腐蝕裂縫發展

(資料來源：林建宏等, [21])

### 參、裂縫與鋼筋腐蝕之循環關係

鋼筋混凝土腐蝕至一定程度後就會生成一層鬆動且易剝落的氧化物( $Fe(OH)_3$ )且該氧化物的體積膨脹至原體積的 2 至 6 倍[22]，如圖 2 - 17 所示。當鋼筋腐蝕生成物累積時則產生膨脹應力，使鋼筋周圍的混凝土受到拉張應力而產生張力裂縫，進而造成鋼筋與混凝土間的握裹力損失，此時由於混凝土之抗拉強度很低，故開始破裂，如圖 2 - 18 所示。混凝土一開始出現細微的裂縫時，強度減低，出現裂縫亦代表鋼筋更容易接觸到外來有害離子，更加速鋼筋的腐蝕。當腐蝕生成物繼續在鋼筋四周累積時，混凝土之裂縫寬度也隨之增大，如圖 2 - 19 所示。

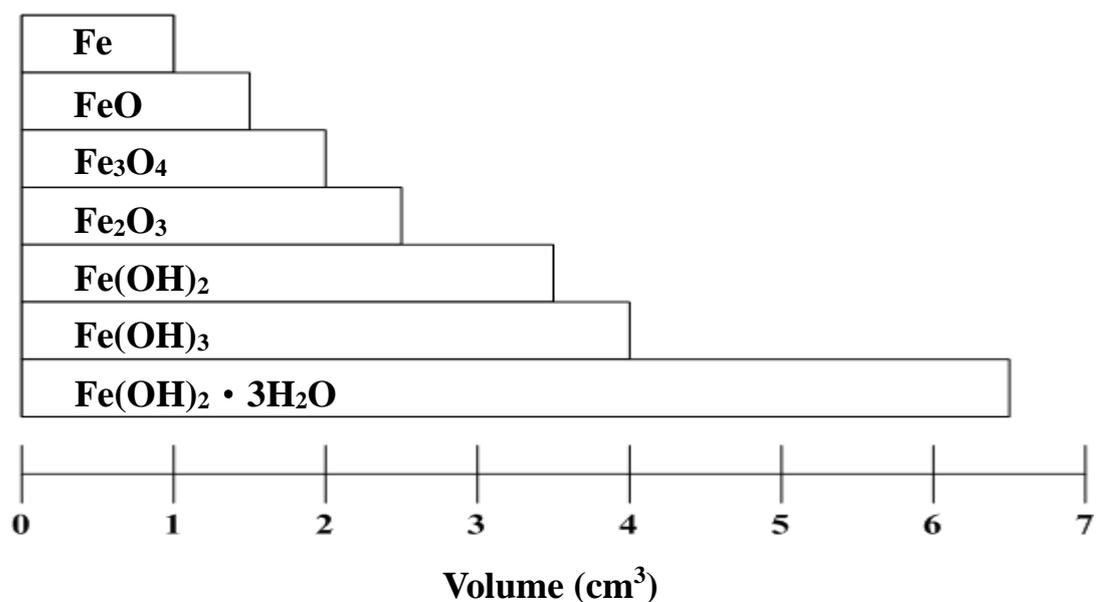


圖 2 - 17 鋼筋與腐蝕生成物的體積比  
(資料來源：Mehta, P.K. and Monteiro, [22])

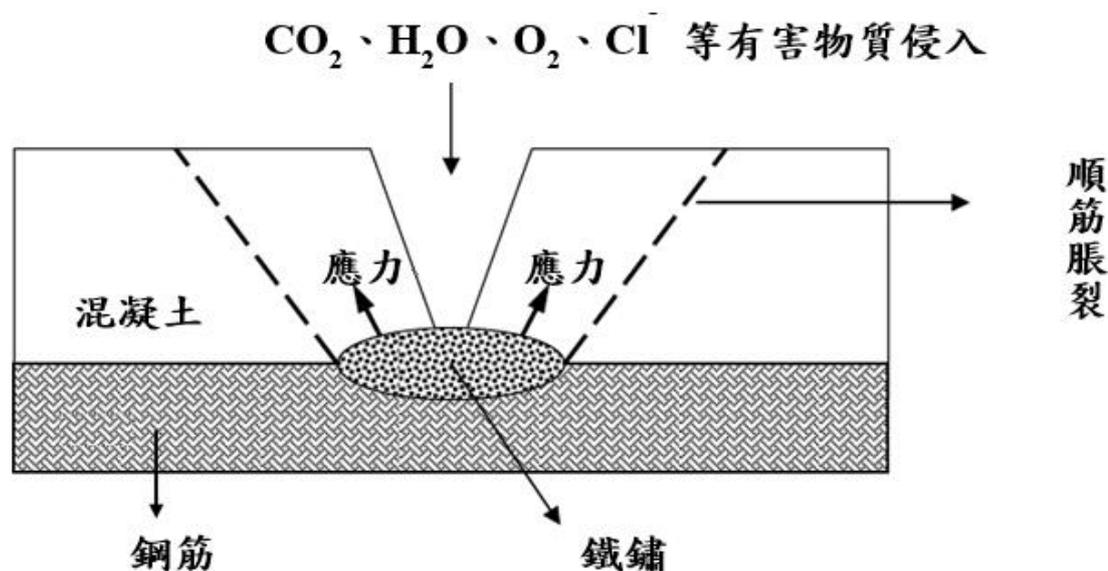


圖 2 - 18 鋼筋腐蝕膨脹應力作用示意圖  
(資料來源：中國土木工程學會, [23])

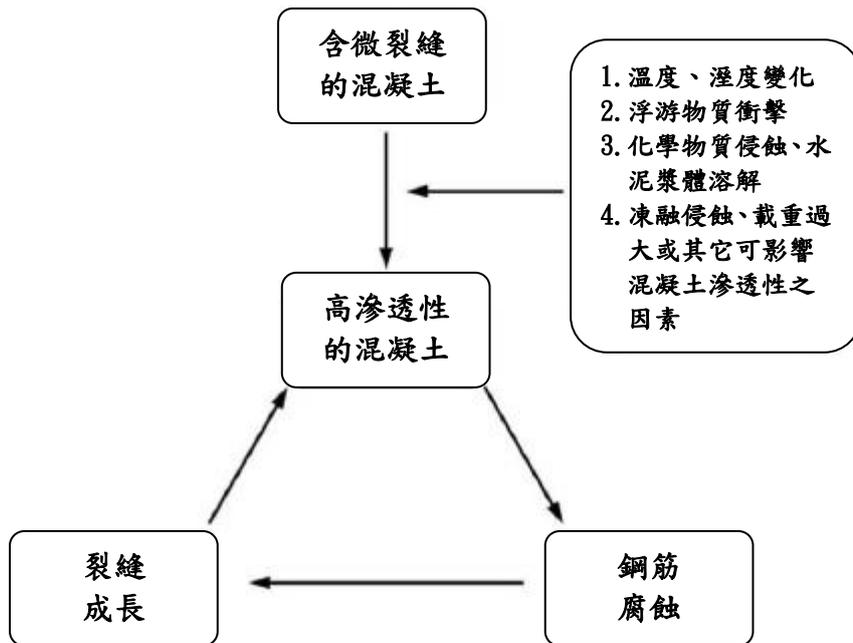


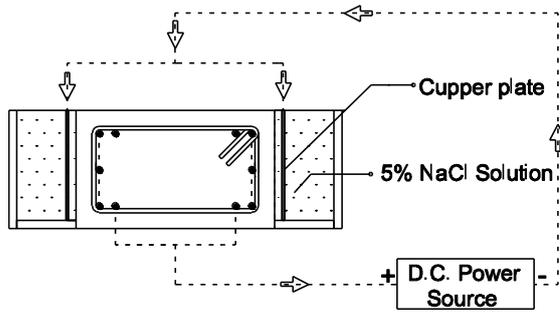
圖 2-19 RC 結構物之裂縫-鋼筋腐蝕-裂縫循環示意圖

(資料來源：黃然等, [24])

鋼筋混凝土結構物於澆置後因為泌水、水份蒸發與溫度變化等因素，於澆置後容易出現細微的裂縫，若再受到物理性或化學性的侵害，即會發生鋼筋腐蝕與混凝土開裂的循環。當鋼筋混凝土結構物已有裂縫產生時，即使是低水灰比設計或增加保護層設計厚度的條件下，混凝土皆會因裂縫的產生而降低耐久性。唯有早期且適當地在裂縫處進行修補、避免有害物質快速進入、降低混凝土的中性化速度等方式可延遲鋼筋腐蝕的發生進而滿足鋼筋混凝土結構物初始設計年限之要求。

#### 肆、通電腐蝕方法與腐蝕量預測

民國 98 年內政部建築研究所報告「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」[18]的腐蝕梁試驗研究採用外加電流強迫腐蝕。加速腐蝕方法係於梁塑鉸區兩側使用木板組裝一個水槽，斷面尺寸為 30 cm×15 cm，長為 50 cm，水槽內添加 5% 的氯離子並於水中放置一個長 49 cm 和寬 30 cm 的銅板且距離梁表面 2 cm。試驗過程中使用直流供應器負極接於銅板，正極接於固定端延伸 5 cm 的單根主筋，剩餘 4 根鋼筋使用烏布林線搭接，詳細接電方式如圖 2-20 所示。當鋼筋半徑損失達到預定目標(由式(2-7)之質量損失估計)時，則停止施加電流。



(a)

(b)

圖 2 - 20 試體加速腐蝕圖：(a)腐蝕示意圖；(b)實際腐蝕  
(資料來源：何明錦等, [18])

實驗結束後將鋼筋由試體取出，再利用重量損失估計鋼筋之平均腐蝕深度  $X_{AVER}$ ：

$$X_{AVER} = \frac{\Delta W_G \times 10^3}{\rho F_e \cdot \pi \cdot \phi \cdot L} \quad (2-10)$$

其中，

$X_{AVER}$  的單位為 mm；

$\Delta W_G$  = 重量的損失，單位為 g

$\phi$  = 鋼筋直徑，單位為 mm

$L$  = 受腐蝕的長度，單位為 mm

$\rho_s$  = 鋼筋密度 (7.86 g/cm<sup>3</sup>)

利用 Faraday's Law 預估重量損失的方法如式(2-11)所示：

$$\Delta W_F = \left\{ A_w / nF \right\} \int I_{COR} \cdot dt \quad (2-11)$$

其中，

$\Delta W_F$  = 理論質量損失

$A_w$  = 鐵的原子量 (55.8g/mol)

$n$  = 亞鐵離子電荷數 = 2 ( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ )

$F$  = Faraday's Constant (96500c/mol)

$\int I_{COR} \cdot dt$  = 腐蝕階段的總電流



## 第三章 小尺寸試體試驗

### 第一節 前置作業

#### 壹、通電加速腐蝕

在自然環境下，鋼筋混凝土構件中的鋼筋受到混凝土的保護故腐蝕速率通常緩慢。因此，本研究利用通電方式來加速鋼筋腐蝕，再於不同加速時間後量測鋼筋腐蝕速率，希望藉由不同試體條件下的非破壞性檢測所得之腐蝕速率來探求影響量測值的因子。除此之外，本研究比較所計算之鋼筋腐蝕量與實際重量損失量，以評估該腐蝕量測法的適用性。

前期試驗中主要以小尺寸之方柱試體進行試驗，後期試驗再進行足尺寸試體量測，探討兩者量測值的差異及建議現地量測的步驟。

#### 貳、試驗材料

本試驗所使用之材料包括竹節鋼筋、氯化鈉及氯化鉀，各組成材料之來源及基本性質如下：

##### (1) 竹節鋼筋

本研究所使用之鋼筋為東和鋼鐵所提供之竹節鋼筋，主要機械性質與化學成分如表 3-1 及表 3-2 所示。配合試體尺寸，本研究中小尺寸試體使用#5 鋼筋，部份探討鋼筋疊置影響的試體則使用#3 鋼筋。

表 3-1 鋼筋機械性質

鋼筋種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	抗拉強度 (N/mm <sup>2</sup> )	實際抗拉強度/ 實際降伏強度	伸長率(%)	彎曲角度	彎曲直徑
SD420W	420-540	550 以上	1.25 以上	12 以上 13 以上	180°	標稱直徑之 3 倍 (D10-D16) 標稱直徑之 4 倍 (D19-D25) 標稱直徑之 6 倍 (D29 以上)

(資料來源：東和鋼鐵)

表 3-2 鋼筋化學成分

名稱	C max(%)	Mn max(%)	P max(%)	S max(%)	Si max(%)	C.E. max(%)
SD420W	0.3	1.5	0.04	0.04	0.5	0.55

(資料來源：東和鋼鐵)

(2) 氯化鈉(NaCl)

本研究使用之氯化鈉為臺鹽實業股份有限公司所生產的高級精鹽，氯化鈉含量達 99.5 % 以上，碘酸鉀 20-35 ppm，主成分為氯化鈉(NaCl)，無特殊成分，用於鋼筋通電時之電解液，如圖 3-1(a)所示，

(3) 氯化鉀(KCl)

本研究使用 Nacalai Tesque 公司所生產試藥級的氯化鉀，用於電極之保存液，使用狀況如圖 3-1(b)所示。

(4) 銅網

本研究使用永昇鐵網有限公司所生產之紅銅網，其規格為 1.2×4 目(內孔 5 mm)，如圖 3-1(c)所示。因銅擁有良好的導電性，故使用此材料作為加速通電時整體通路的負極。

(5) 白金鈦網

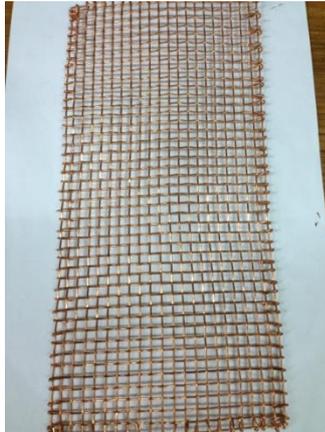
本試驗使用廣鉸電化學設備有限公司所生產之白金鈦網，其規格為 250 mmx150 mm (網目 6.5 mm x 12 mm，線徑 1.0 mm x 1.0 mm)，如圖 3-1(d)所示。白金鈦網具有優良的耐蝕性、導電性及電催化活性，故使用此材料作為恆電位恆電流儀 VersaSTAT 量測時整體通路的負極。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-1 主要試驗用材料：(a) 台鹽高級精鹽；(b) 飽和氯化鉀溶液及浸泡在 KCl 之電極；(c) 紅銅網；(d) 白金鈦網

(資料來源：本研究拍攝)

### 參、試驗設備

#### (1) 電源供應器

本研究所使用之數位直流電源供應器為托福電子公司所生產之 3601D 數位顯示型直流電源供應器(圖 3-2)，詳細規格如表 3-3 所示。

表 3-3 直流電源供應器詳細規格

輸出電壓	0-30 V×1 組可調輸出
輸出電流	0-3 A×1 組可調輸出
負載穩定度	±0.01%+2 mV
輸入穩定度	±0.01+2 mV
脈動與噪音(≤200 W)	≤0.5 mVrms
脈動與噪音(≥200 W)	≤1 mVrms
負載穩定度(≤100 W)	≤10 mA
負載穩定度(≥100 W)	≤15 mA
輸入穩定度	±0.01+2 mV
脈動與噪音(≤200 W)	≤2 mArms
脈動與噪音(≥200 W)	≤3 mArms
數字顯示(D)	≤0.1%+2 d
上升時間(不設負載)	≥100 mS
上升時間(設負載)	≤200 mS(<6 A) ≤500 mS(<10 A) ≤1 S(≥10 A)
下降時間(不設負載)	≤2.5 S
下降時間(設負載)	≥250 mS
輸出阻抗	<2 mΩ+2 uH
回復時間	≤100 μS 至設定電壓 0.1 % 內 (50 % - 100 % 負載變換)
串聯連接	可串聯不同型號(≤240 V)
並聯連接	可並聯相同型號(≤24 A)
電源	ACV 100 V/120 V/220 V/240 V±10% 60 Hz/50Hz , (ACV230 V , 50 Hz)

(資料來源：托福電子)



圖 3-2 數位直流電源供應器

(資料來源：本研究拍攝)

**(2) GalvaPulse 腐蝕量測儀**

本研究所使用之儀器 GalvaPulse GP-5000 為丹麥 Germann Instruments 所生產之現地量測腐蝕儀器，如圖 3-3 所示，規格如表 3-4 所示。其利用脈衝原理來量測混凝土中鋼筋的腐蝕速率，同時亦可量測鋼筋之半電池電位與保護層電阻。此法中，儀器施加短電流脈衝於鋼筋上，由鋼筋電位的改變量來推算鋼筋腐蝕速率[16]。該儀器適用於現地量測，可用於濕潤或半乾燥的混凝土表面，甚至該表面可為粗糙或曲面[17]。人員於使用該儀器前，必須詳閱使用說明書，瞭解儀器操作及腐蝕電流密度換算為腐蝕速率的方式，其它現地的量測步驟細節可參見第五章所述。



**圖 3-3 GalvaPulse 腐蝕量測儀**

(資料來源：本研究拍攝)

**表 3-4 GalvaPulse 腐蝕量測儀規格概要**

脈衝電流	5 – 400 $\mu$ A
脈衝時間	1 – 20 s
量測鋼筋直徑	2 – 100 mm
半電池電位量測	Ag/AgCl 電極量測電位， $\pm 5$ mV
電阻量測	$\pm 5\%$
資料儲存	20000 筆資料上限於手持電腦

(資料來源：Germann Instruments)

**(3) VersaSTAT4 恆電位恆電流儀**

本研究亦使用恆電位恆電流儀量測小尺寸試體的腐蝕，該儀器可進行直流極化法及交流阻抗法量測，最高可提供 1 A 電流及 500 kHz 取樣速率(2  $\mu$ s)，可用於更快速的資料擷取與掃描速率。該儀器亦配備外加電流與電壓通道上的類比濾波器選

項，可進行優異的信號/雜訊測量，如圖 3-4 所示，規格如表 3-5 所示。由於此儀器精度高、搬運較不易，一般用於實驗室內進行各項電化學試驗，不適用於現地量測。使用人員宜先修習相關電化學課程，以瞭解各項方法的量測原理。操作前除了閱讀手冊外，必須根據需求適當設定量測參數，最後再合理分析數據。



圖 3-4 VersaSTAT 恆電位恆電流儀

(資料來源：本研究拍攝)

表 3-5 VersaSTAT 恆電位恆電流儀規格概要

輸出電壓	$\pm 12\text{V}$
輸出電流	$\pm 1\text{A}$
電壓控制	施加範圍： $\pm 10\text{V max.}$ 解析度： $\pm 10\text{ mV} = 300\text{ nV}$ 精確度： $\pm 0.2\%$ of value, $\pm 2\text{ mV}$
電壓量測	範圍： $\pm 10\text{ V max.}$ 解析度： $\pm 6\text{ }\mu\text{V min.}$ 精確度： $\pm 0.2\%$ reading, $+ 2\text{ mV}$
電流控制	施加範圍： $\pm\text{full scale per range}$ 解析度： $1/32000 \times \text{full scale}$ 精確度： $\pm 0.2\%$ of range, $\pm 200\text{ pA}$
電流量測	範圍： $2\text{A to } 4\text{ nA}$ 精確度： $4\text{nA and } 20\text{nA ranges, } <5\% \pm 50\text{ pA}$
AC 阻抗量測	頻率範圍： $10\text{ }\mu\text{Hz to } 1\text{ MHz}$ 最大 AC 振幅： $1000\text{ mV RMS}$ 最小 AC 振幅： $0.1\text{ mV RMS}$

(資料來源：Princeton Applied Research)

## 第二節 研究方法

### 壹、試體設計

本研究中，試體主要分為兩類，包括用於探討保護層厚度影響及鋼筋疊置影響的試體。就前者而言，試體的頂面、底面及三側面塗封，以控制腐蝕位置，如圖 3-5 及圖 3-6 所示。另為配合量測電極的大小(直徑 10 cm)，量測面的寬度設定為 12 cm。然而，本研究中為方便標示鋼筋位置，設定試體量測面到鋼筋中心的位置為 3 cm、6 cm、9 cm，此亦為本研究中所謂之「保護層厚度」。由於小試體使用#5 鋼筋，故若以通用的保護層定義，則保護層厚度分別為 2.21 cm、5.21 cm、8.21 cm。

為了模擬現地實務所使用的箍筋與主筋，故交疊的鋼筋尺寸不同，採用#3 鋼筋，試體形式如圖 3-6(a)所示，量測面為頂面，實際使用模具如圖 3-7 所示。此外，為了探討磁磚披覆混凝土影響腐蝕量測的影響，於後期執行階段時，此兩類試體的量測面將嘗試貼覆磁磚。然而，由於磁磚種類很多，參考專家座談會的建議，配合試體尺寸及現地常用的種類選定用二丁掛磚及馬克磚。

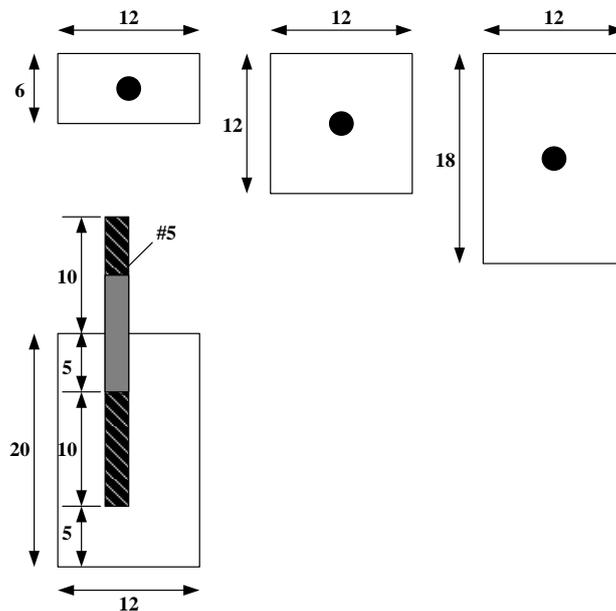


圖 3-5 小尺寸試體設計(保護層厚度的影響)

(資料來源：本研究繪製)

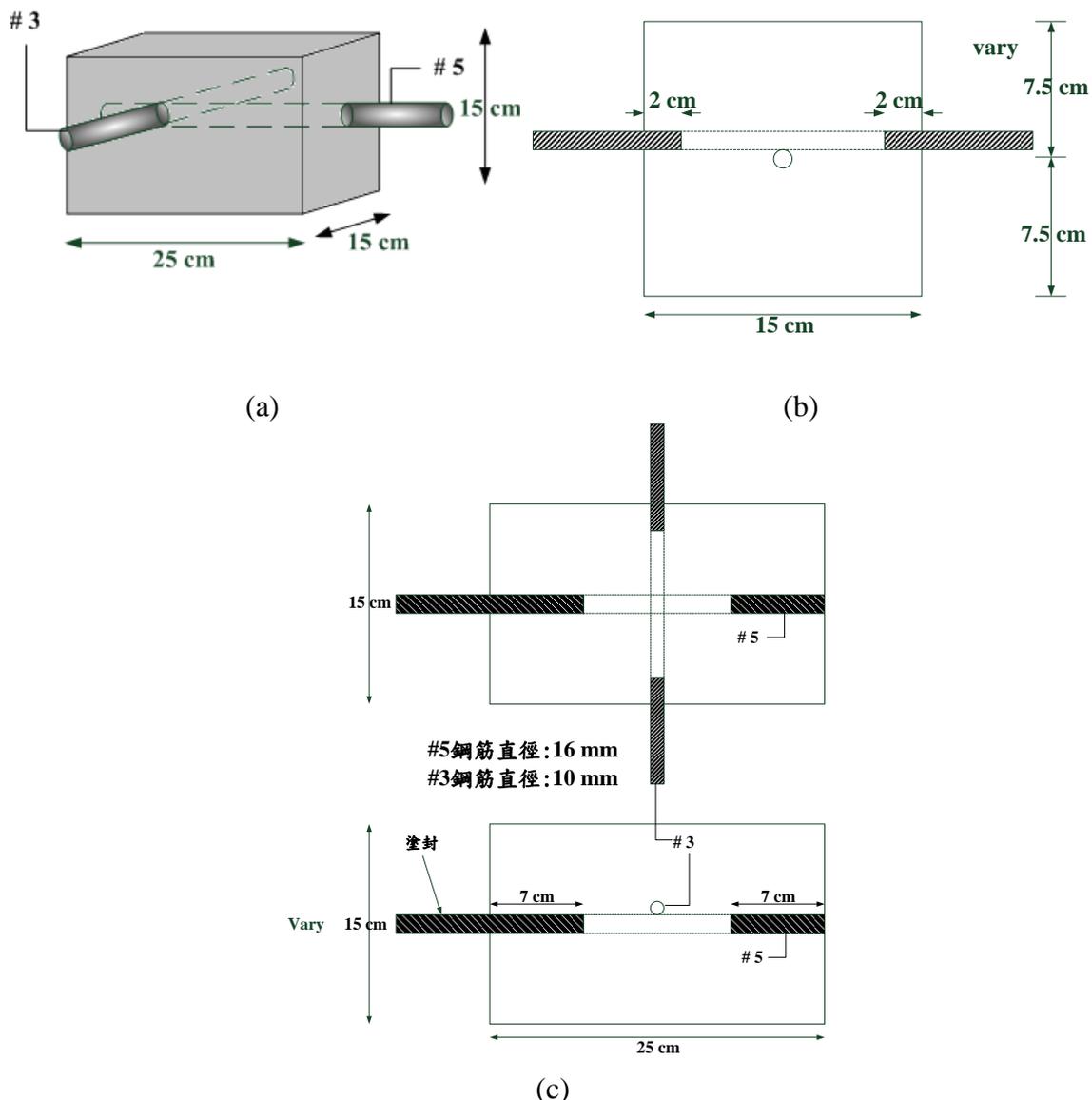


圖 3-6 小尺寸試體設計(鋼筋配置的影響)

((a)3D 模擬圖；(b)側視圖；(c)上視圖與前視圖)

(資料來源：本研究繪製)

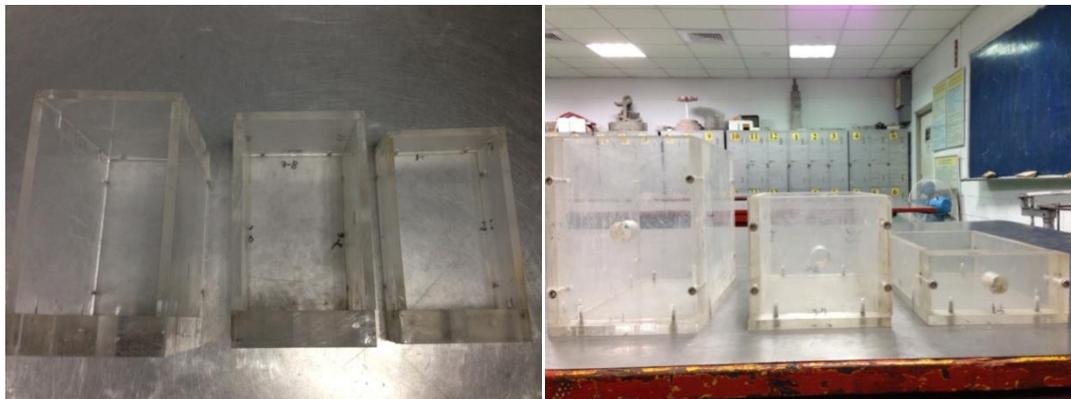


圖 3-7 試體模具

(資料來源：本研究拍攝)

## 貳、試驗變數

小尺寸試體的試驗變數主要包括三大類：

### (1) 材料因子

#### (a) 水灰比

由於水灰比關係到試體的孔隙率甚至於電阻，有可能影響量測電流的大小與傳遞，故本研究採用三種水灰比包括 0.4、0.5、0.6，涵蓋常用之水灰比。

#### (b) 粗細粒料體積比

粒料本身的導電率與漿體不同，預期會改變量測電流的傳遞路徑，當粗粒料比例過高時，很可能進一步改變電流大小，故本研究先以 ACI 配比設計法製作一組混凝土試體，再以細粒料取代部份粗粒料，探討不同粗細粒料比對量測值的影響。

#### (c) 含水量

含水量影響混凝土的導電率甚巨，亦影響鋼筋的瞬時腐蝕速率，故本研究使用真空烘箱，藉由控制烘乾時間來精確達到目標的含水量。

#### (d) 氯離子含量

本研究將試體浸泡鹽水中以加速腐蝕，所滲入的氯離子將造成鋼筋的孔蝕。當鋼筋腐蝕不均勻時，能否適當地探測出位置，量測值是否合理，有待進一步探討。

#### (e) 鋼筋配置

目前文獻上多僅探測表面鋼筋，然而隨著新規範的修訂及構件耐震能力的要求，主筋數量增加，間距降低，甚至使用更多的箍筋，傳統的量測方式或許不適宜量測主筋腐蝕。本研究首度嘗試多根鋼筋，以疊置方式模擬現地箍筋與主筋交接處的腐蝕行為，探討量測技術的改善方式。

#### (f) 保護層厚度

保護層厚度關係到量測電流的傳遞路徑及有效施載電壓電流的大小。過去的經驗顯示，當保護層厚度較大時，量測值較不穩定且較低。因此，本研究參考規範及實務上的應用，探討現行常用保護層厚度下，腐蝕量測可能的變化。

(2) 使用因子

(a) 表面處理

實務上多數的建築構件並非完全裸露，往往貼覆磁磚。即使如此，混凝土內埋鋼筋依然可能因內部存在氯離子或裂縫而造成外界水份入侵而腐蝕。文獻及規範對此類構件的腐蝕量測法闕如，因此本研究透過加速腐蝕，一方面瞭解腐蝕型態的差異，一方面發展可能的量測技術。

(3) 量測因子

(a) 量測電壓/電流

電化學量測鋼筋腐蝕的基本原理係施以系統一微小擾動，再視反應來判斷腐蝕電流大小，該擾動可為一微小電壓或電流。過小的擾動造成反應訊號不足，量測值不穩定且不精確，若過大的擾動則加速鋼筋的腐蝕。然而，有效電壓或電流的決定應視試體條件而異，本研究使用目前常用的兩種電化學腐蝕量測法，配合上述試體條件，探討量測電壓對腐蝕量測的影響。以直流極化法而言，係調整原施加的電壓範圍( $\pm 10$  mV)，而脈衝量測法則調整原脈衝電流大小( $25 \mu\text{A}$ )。

(b) 量測時間

如前所述，不僅施加的電壓電流影響量測結果，量測時間亦為關鍵，與系統受擾動後回復穩定的能力有關，亦即與試體的條件相關。若時間太短，量測值不穩定，若時間太長，則可能進一步極化鋼筋。因此，就直流極化法而言，本研究將改變每一施載電壓的停留時間。就脈衝電流法而言，則調整施載脈衝電流的時間。

### 參、試驗方法

本研究中，試體依上述試驗參數調整配比及模具後拌合，拆模後再以石灰水養護 28 天，取出後以環氧樹脂塗封，浸泡於 3.5 % NaCl 水溶液中，再通以腐蝕電流密度  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，相當於總通電量為 0.05 A。連續通電 3、5、7 天後，部份試體用以探討保護層水份的影響，故必須再置於真空烘箱，利用真空去除水份以達到預定的含水量，此方法可避免因加溫造成鋼筋附近的微觀破壞。之後，利用恆電位恆電流儀、脈衝腐蝕量測儀等量測鋼筋的腐蝕電位、腐蝕電流密度，可進一步求得腐蝕速率。以上過程重覆直至試體鏽水逸出，或於預定通電齡期到達後將鋼筋從試體中取出、除鏽、稱重並計算實際之腐蝕損失量，試驗部分過程如圖 3-8 至圖 3-10 所示。就交疊鋼筋試體而言(圖 3-11)，以通電模擬主筋與箍筋同時腐蝕，較接近現地狀況，亦即主筋與箍筋皆腐蝕但腐蝕程度不同。對於該試體，本研究將量測主筋的腐蝕電流密度，最後與重量損失法的結果相較。

研究的後期討論磁磚披覆混凝土對內埋鋼筋腐蝕的影響，試體設計如同前述，不同處僅試體的量測表面再貼覆磁磚。由於磁磚的電阻與混凝土顯著不同，預期加速電流多透過磁磚間的灰縫導出，同時鋼筋腐蝕的型態應與未披覆的試體極為不同，更加不均勻。本研究拍照記錄，並以相關儀器量測腐蝕電位及腐蝕電流密度。然而，由於不同儀器的電極尺寸、靈敏度不同，能否得到有效的量測值於本研究中的試驗結果討論。試驗結果顯示，由於多數量測值不穩定，故量測前移除披覆面。未來於實務應用上可參考本研究的成果，儘量減少試體破壞，以最少的人力及時間成本獲得有效的量測值。

本研究發現腐蝕量測值與前述之各相關因子有關，為解釋此差異，進一步探討機理，因此於各試體破壞時，將分層取樣，觀察微觀結構及氯離子分佈，以瞭解腐蝕位置的發生原因及腐蝕電流可能傳遞的路徑。



圖 3-8 試體通電過程

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-9 利用 Galvapulse 進行量測

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3 - 10 試體中的腐蝕鋼筋  
(資料來源：本研究拍攝)



圖 3 - 11 含交疊鋼筋試體  
(資料來源：本研究拍攝)

### 第三節 試驗結果

#### 壹、先期試驗

先期試驗包括少部份的試體及試驗，目的在於熟悉儀器操作及探討後續試驗適用的試驗參數及可能遇到的困難。本研究首先嘗試水灰比 0.6、保護層厚度 6 cm 的砂漿試體，過程中將鋼筋通以 0.05 A 電流(固定腐蝕電流密度  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ )使其加速腐蝕且在每天固定的時間內以 GalvaPulse 進行測量，試驗結果如表 3-6、圖 3-12 及圖 3-13 所示。試驗結果可發現計算腐蝕量約與重量損失成正比，故本研究所使用的量測及估算腐蝕量方法應可行。此外，由實際的量測發現，每天的量測值都有所差異，說明腐蝕是一個動態過程，若僅以某時間點的單次腐蝕速率來評估鋼筋的腐蝕速率與腐蝕量並不可靠，需要長時間的觀測來瞭解其腐蝕變化。

加速 7 天後試體的腐蝕電流密度量測值開始不穩定也較不易量測，需要兩次以上的施測，因此多數的試驗中，總通電時數設定至 9 天。此結果說明電化學量測法仍有其限制，尤其當腐蝕嚴重時，高量的腐蝕生成物在鋼筋表面，相當大幅改變電化學性質，與儀器適用的條件不符。

表 3-6 水灰比 0.6、6 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

通電時間	總通電時間		
	5 days	7 days	9 days
第 1 天	1.8123	12.4843	5.8026
第 2 天	11.4133	13.5280	19.3210
第 3 天	13.8470	11.9506	20.7266
第 4 天	15.5436	8.4573	36.0826
第 5 天	49.9596	23.8806	18.4553
第 6 天		20.9420	22.0213
第 7 天		19.5983	15.8483
第 8 天			26.7633
第 9 天			23.3206

(資料來源：本研究試驗結果整理)

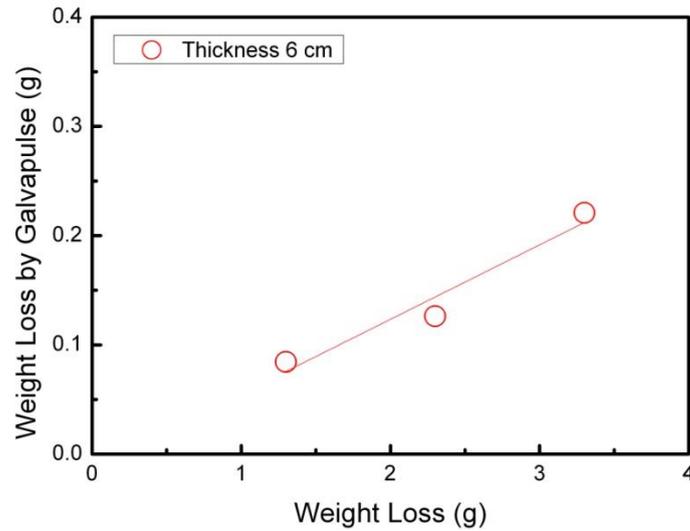


圖 3-12 計算腐蝕量與重量損失的關係(先期試驗)  
(資料來源：本研究試驗結果)

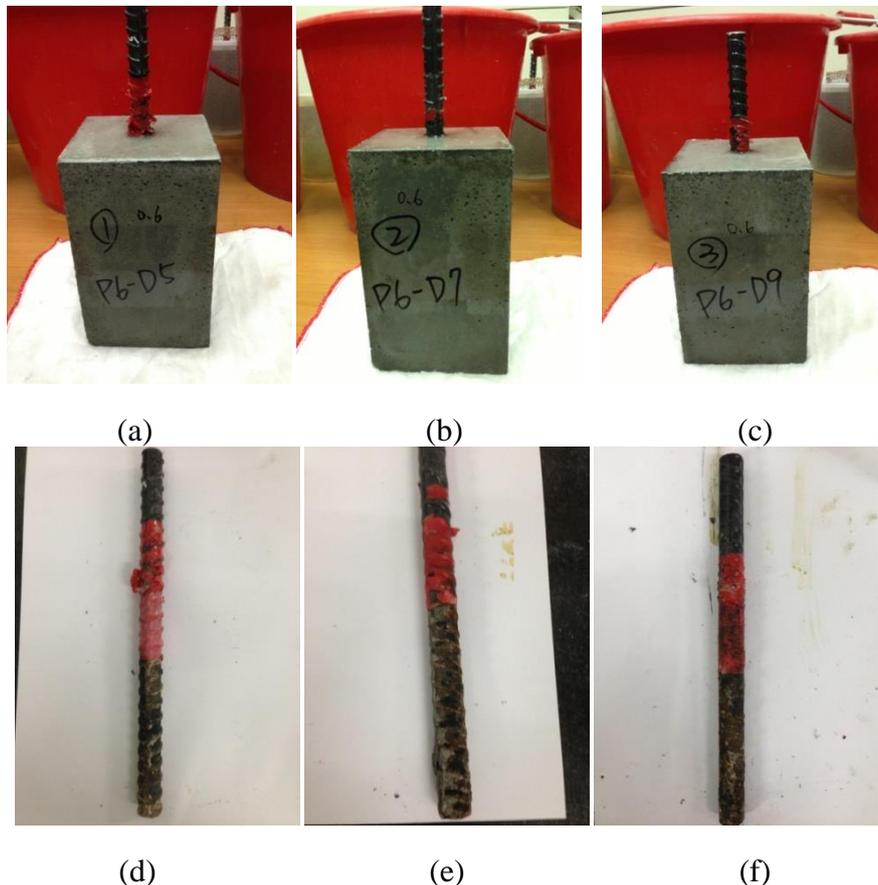


圖 3-13 不同通電齡期下的試體與內埋鋼筋：(a) 5 天通電齡期試體；(b) 7 天通電齡期試體；(c) 9 天通電齡期試體；(d) 5 天試體取出之鋼筋；(e) 7 天試體取出之鋼筋；(f) 9 天試體取出之鋼筋  
(資料來源：本研究拍攝)

## 貳、保護層厚度

本研究中的試體固定水灰比為 0.6，改變保護層厚度 3 cm、6 cm、9 cm 後的試驗結果如表 3-7、表 3-8 及圖 3-14 所示。就脈衝量測法而言，大致上計算腐蝕量與重量損失間約成正比，如圖 3-14(a)所示。由趨勢線的斜率可發現脈衝量測法低估了重量損失，兩者間的正比係數約在 9-19 間，如表 3-9 所示。此低估的原因可能是脈衝法僅量測鋼筋單面而非整根鋼筋的腐蝕電流。即使如此，由於兩者間成正比，未來於現地使用上仍可經由計算腐蝕量再乘以單一係數即可估算實際腐蝕量。此外，在保護層 3 cm 及 6 cm 時，正比的趨勢較明顯，此結果亦說明了在此厚度下，量測值較不受到保護層厚度所影響，若以趨勢線估算，此係數約在 15-18 之間。然而，在保護層厚度 9 cm 時的試驗結果略顯不穩定，很可能因為此時保護層厚度大，保護層本身的阻抗大，造成量測值不穩。換言之，脈衝法較不適用在保護層厚度較大的構件。

以直流極化法所量測的結果如圖 3-14(b)所示，計算腐蝕量約與重量損失成正比。如同脈衝量測法，直流極化法低估了重量損失，兩者間相差最高可達係數 70，可能源於除了量測面的問題外，電極面積亦太小，故有效量測長度短，更無法準確估算實際重量損失。

到達預定通電時間後，試體破壞後取出鋼筋稱重，如圖 3-15 及圖 3-16 所示，可發現鋼筋鏽蝕嚴重，接近均勻腐蝕，合乎本研究加速腐蝕試驗的假設。

**表 3-7 水灰比 0.6、保護層厚度 3 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

通電時間	總通電時間		
	5 days	7 days	9 days
第 1 天	21.0233	55.7867	65.6370
第 2 天	47.2866	52.8680	95.2193
第 3 天	31.3103	46.3970	51.5580
第 4 天	30.7223	28.2900	24.1500
第 5 天	28.5510	48.8613	18.8716
第 6 天		15.1187	14.2808
第 7 天		45.6617	6.8268
第 8 天			21.6840
第 9 天			33.9983

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3-8 水灰比 0.6、保護層厚度 9 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

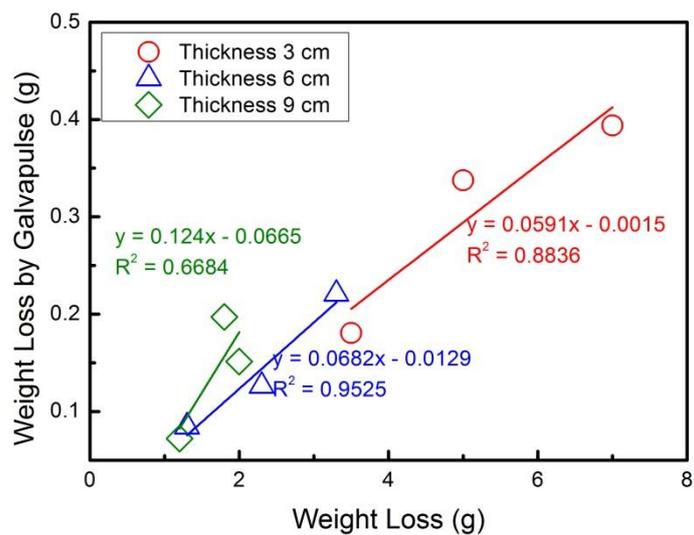
量測間距	通電時間		
	5 days	7 days	9 days
保護層厚度	9 cm		
第 1 天	7.5873	4.6791	4.4885
第 2 天	15.3940	9.4695	16.6526
第 3 天	18.8406	11.9656	14.2903
第 4 天	10.7476	14.1135	13.3062
第 5 天	10.4265	14.2501	16.2053
第 6 天		17.4620	12.2370
第 7 天		31.3360	13.0886
第 8 天			22.6910
第 9 天			16.1597

(資料來源：本研究試驗結果整理)

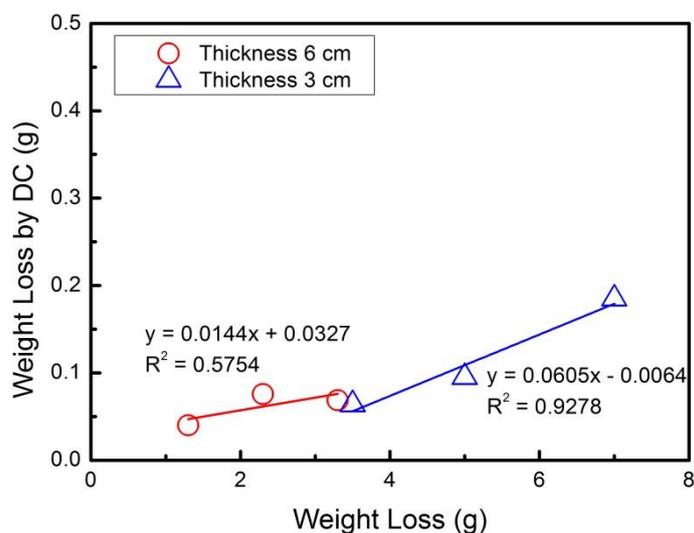
表 3-9 不同保護層厚度下計算腐蝕量與重量損失之關係 (水灰比：0.6)

保護層厚度 (cm)	總通電時間 (days)	通電前重 (g)	除鏽後重 (g)	實際腐蝕量 (g)	計算腐蝕量 (g)	係數
		A	B	C=A-B	D	E=C/D
3	5	391.2	387.7	3.5	0.1807	19.368
3	7	395.6	390.6	5.0	0.3375	14.811
3	9	393.4	386.4	7.0	0.3938	17.771
6	5	392.1	390.8	1.3	0.0844	15.390
6	7	395.0	392.7	2.3	0.1262	18.216
6	9	391.9	388.6	3.3	0.2207	14.947
9	5	388.0	386.8	1.2	0.0722	16.619
9	7	389.4	387.6	1.8	0.1970	9.134
9	9	386.7	384.7	2.0	0.1512	13.223

(資料來源：本研究試驗結果整理)



(a)



(b)

圖 3-14 不同保護層厚度下計算腐蝕量與重量損失間的關係((a)脈衝量測法；(b)直流極化法，水灰比 0.6)

(資料來源：本研究試驗結果)

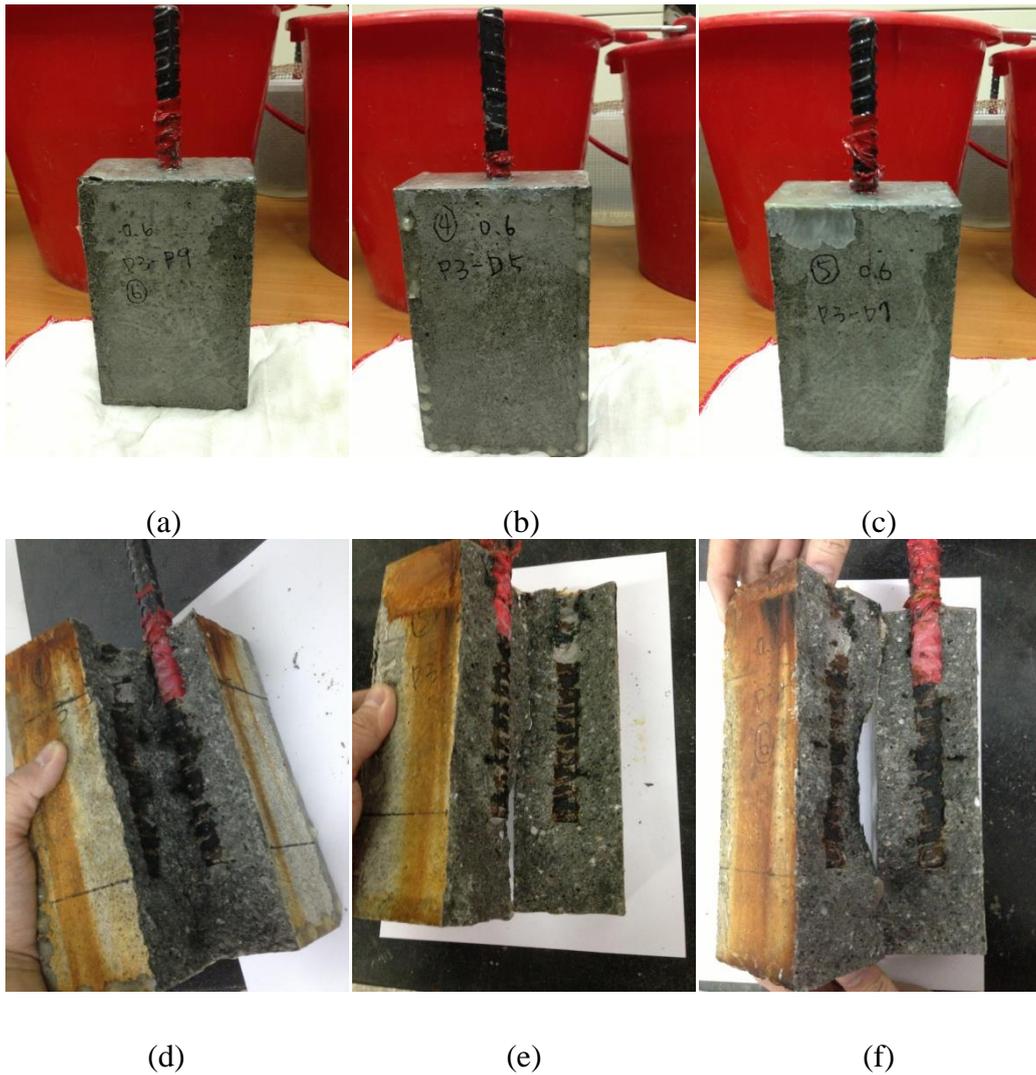
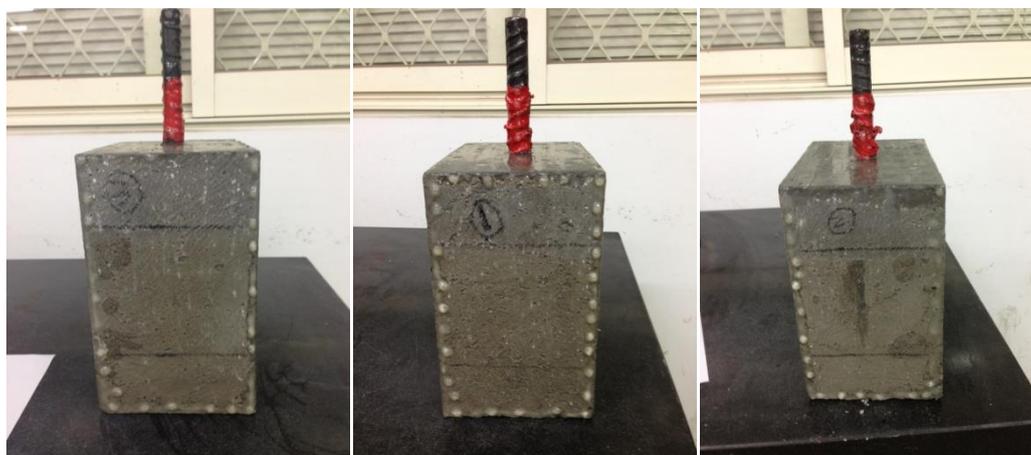


圖 3 - 15 保護層厚度 3 cm 的試體與取出鋼筋過程：(a) 5 天通电龄期試體；(b) 7 天通电龄期試體；(c) 9 天通电龄期試體；(d) 5 天試體取出鋼筋過程；(e) 7 天試體取出鋼筋過程；(f) 9 天試體取出鋼筋過程

(資料來源：本研究拍攝)



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

圖 3 - 16 保護層厚度 9 cm 的試體與取出鋼筋過程: (a) 5 天通電齡期試體; (b) 7 天通電齡期試體; (c) 9 天通電齡期試體; (d) 5 天試體取鋼筋過程; (e) 7 天試體取鋼筋過程; (f) 9 天試體取鋼筋過程 (資料來源: 本研究拍攝)

### 參、水灰比

此研究固定試體保護層的厚度為 6 cm 再改變水灰比，試驗結果如表 3-6、表 3-10、表 3-11 及圖 3-17 所示。整體而言，計算腐蝕量仍然低估重量損失，而此低估量與水灰比相關，遠大於保護層厚度的影響，如表 3-12 所示。就水灰比 0.6 的試體而言，計算腐蝕量與重量損失間成正比，如圖 3-17(a)所示。因此，如前段所述，於實務量測時，仍可藉由單一係數換算求得實際腐蝕量，此係數大約是 15-18。此外，該結果亦顯示，脈衝量測法較直流極化法更能準確量測腐蝕量。水灰比 0.4 與水灰比 0.5 的試驗結果如圖 3-17(b)與圖 3-17(c)所示，計算腐蝕量與重量損失間的正比關係較不明顯，尤其在水灰比 0.4 時，量測值相當不穩定。換言之，無論是直流極化法或是脈衝腐蝕量測法，在水灰比較低時，量測值較無法精確估算實際腐蝕量，很可能的原因是低水灰比下，保護層的阻抗太高，故量測值不穩定。

水灰比的影響可再次由圖 3-18 說明，在同一保護層厚度下，即使計算腐蝕量仍低估重量損失，但不同水灰比的趨勢線斜率明顯不同，亦即不宜以單一係數換算。試體破壞後的照片如圖 3-19 及圖 3-20 所示，可以發現水灰比 0.4 的試體，其腐蝕形態明顯不均勻，或許這也說明為何量測儀器無法較準確量測腐蝕速率進而推算腐蝕量。於現地使用時，早期鋼筋腐蝕的量測值或許不精確，仍需藉由長期量測以降低誤差。

由於前述水灰比 0.4 之試體呈現量測值不穩定，可能源於保護層厚度大，所以阻抗大，鋼筋不易被極化，因此後續試驗嘗試降低保護層為 3 cm，試驗結果如表 3-12 至表 3-14 及圖 3-21 所示。此結果顯著與水灰比 0.6 試驗的結果不同，就個別試驗點而言，係數變化大，最高之係數接近 90。然而，由圖 3-21 卻顯示，計算腐蝕量與重量損失間約成線性但具一截距，由其斜率可估算係數約 15，與前述水灰比 0.6 的試驗結果近似。換言之，在水灰比 0.4、保護層 3 cm 下，腐蝕量仍可由計算腐蝕量推求，但計算腐蝕量必須先扣除某量，此時大約是 2 g。造成此截距的原因不明，似乎在較低腐蝕量(小於 2 g 時)，脈衝腐蝕儀並不能有效量測出腐蝕電流，故計算腐蝕量偏低並近似於零，此現象有待後續研究。同理可推測水灰比 0.5 之試體，在保護層 6 cm 時(圖 3-17(b))，由其斜率所估的係數約 6.72，此時截距約 1 g。綜合以上發現，在水灰比 0.5 以上且保護層厚度 6 cm 以下時，實際腐蝕量約可以用係數 15 保守估計。

表 3 - 10 水灰比 0.4、保護層厚度 6 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

通電時間	總通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	14.4776	1.0075	1.1686
第 2 天	1.0936	4.5847	1.0453
第 3 天	1.4710	12.6750	5.5807
第 4 天		10.6042	4.8491
第 5 天		1.3040	1.6302
第 6 天			4.2443
第 7 天			4.5608

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3 - 11 水灰比 0.5、保護層厚度 6 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測間距	通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	0.2353	0.5390	0.6100
第 2 天	0.7946	0.5927	1.0085
第 3 天	3.3220	0.9843	3.2373
第 4 天		1.6807	3.2110
第 5 天		1.8645	5.0168
第 6 天			8.1976
第 7 天			12.4470

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3 - 12 水灰比 0.4、保護層厚度 3 cm 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測間距	通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	1.8649	2.6439	2.0824
第 2 天	7.4827	9.3511	12.4973
第 3 天	20.5396	30.3000	43.6480
第 4 天		33.8423	14.6146
第 5 天		20.2451	33.1370
第 6 天			26.9416
第 7 天			36.6460

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3 - 13 不同水灰比下計算腐蝕量與重量損失之關係 (保護層厚度：6 cm)

通電時間 (days)	通電前重 (g)	除鏽後重 (g)	實際腐蝕量 (g)	計算腐蝕量 (g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
<b>水灰比 0.4</b>					
3	389.3	388.3	1.0	0.0203	49.076
5	386.2	385.5	0.7	0.0368	18.974
7	389.0	387.3	1.7	0.0259	65.411
<b>水灰比 0.5</b>					
3	385.6	384.6	1.0	0.0033	297.396
5	386.4	385.4	1.0	0.0059	169.223
7	386.1	384.9	1.2	0.0343	34.915
<b>水灰比 0.6</b>					
5	392.1	390.8	1.3	0.0844	15.390
7	395.0	392.7	2.3	0.1262	18.216
9	391.9	388.6	3.3	0.2207	14.947

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3 - 14 水灰比 0.4 下計算腐蝕量與重量損失之關係

通電時間 (days)	通電前重 (g)	除鏽後重 (g)	實際腐蝕量 (g)	計算腐蝕量 (g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
<b>保護層 6 cm</b>					
3	389.3	388.3	1.0	0.0203	49.076
5	386.2	385.5	0.7	0.0368	18.974
7	389.0	387.3	1.7	0.0259	65.411
<b>保護層 3 cm</b>					
3	387.4	385.1	2.3	0.0245	93.88
5	390.8	386.2	3.6	0.1078	33.40
7	389.7	384.9	4.8	0.1890	23.40

(資料來源：本研究試驗結果整理)

以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究

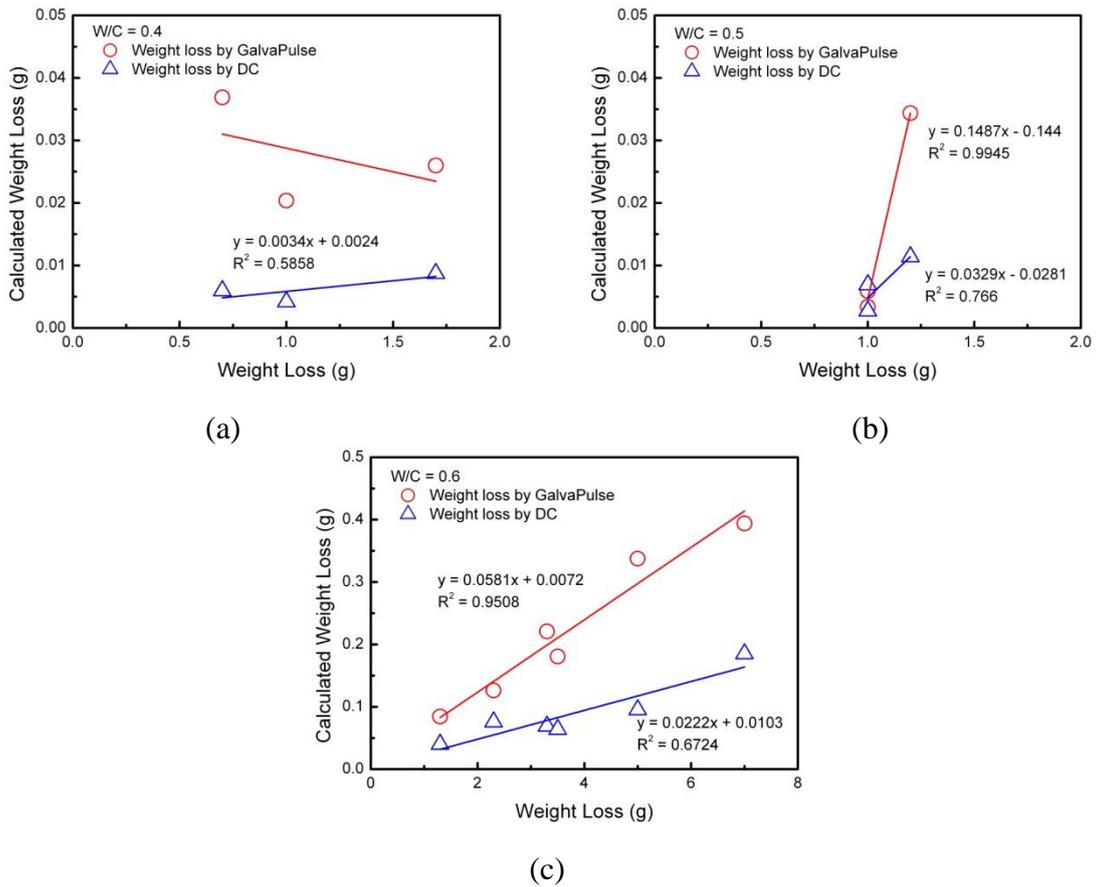


圖 3 - 17 不同水灰比下計算腐蝕量與重量損失間的關係((a)w/c=0.4 ; (b)w/c=0.5 ; (c)w/c=0.6 , 保護層 : 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

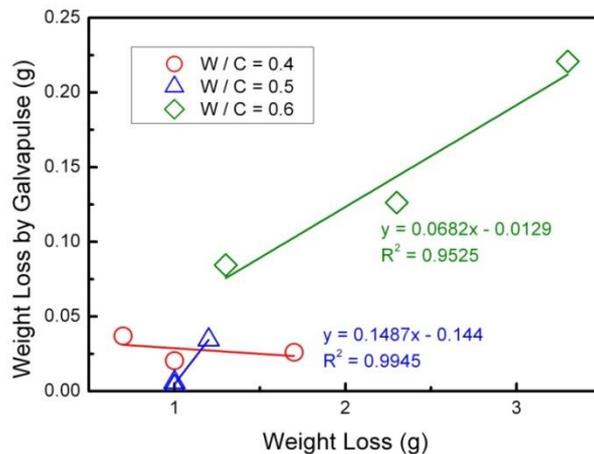


圖 3 - 18 不同水灰比下計算腐蝕量與重量損失間的關係(脈衝腐蝕量測法, 保護層厚度 : 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

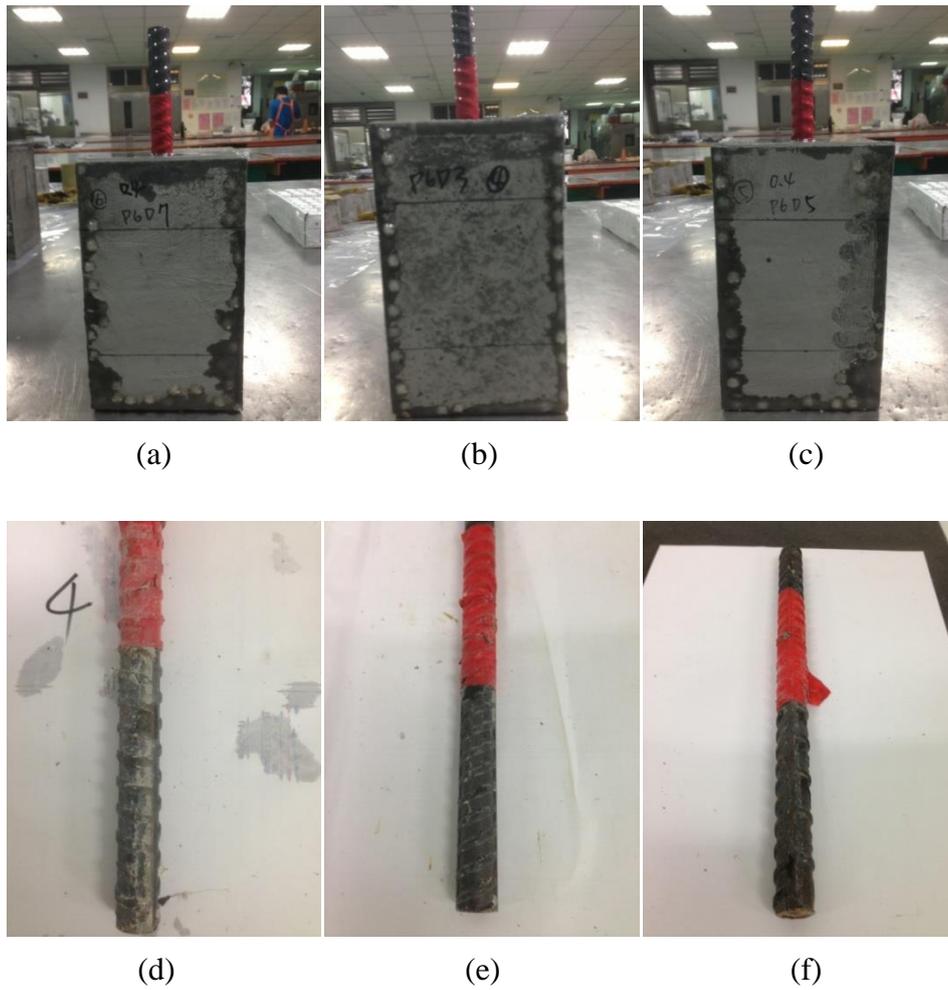


圖 3 - 19 水灰比 0.4 的試體與取出鋼筋過程: (a) 3 天通電齡期試體; (b) 5 天通電齡期試體; (c) 7 天通電齡期試體; (d) 3 天試體取出之鋼筋; (e) 5 天試體取出之鋼筋; (f) 7 天試體取出之鋼筋  
(資料來源：本研究拍攝)

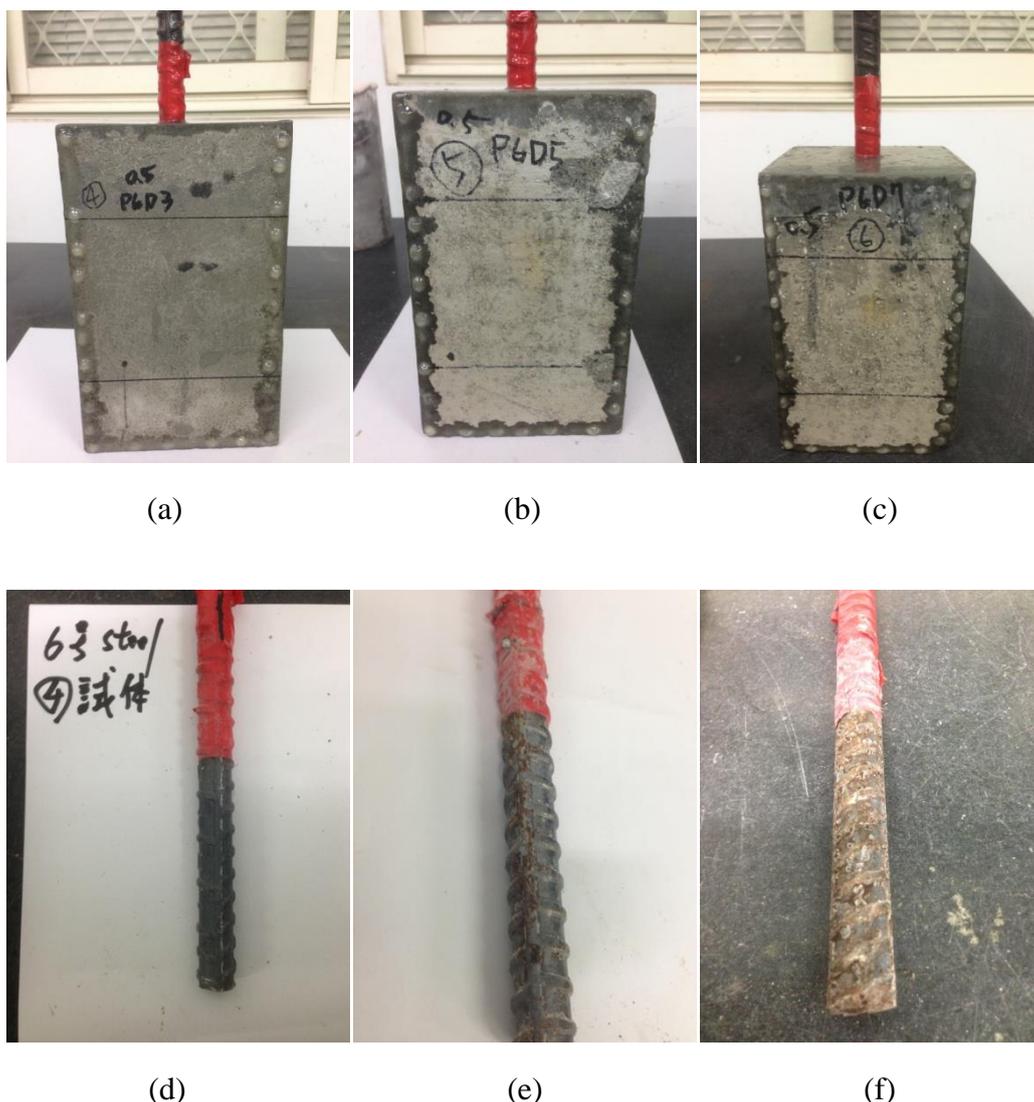


圖 3 - 20 水灰比 0.5 的試體與取出鋼筋過程: (a)3 天通電齡期試體; (b) 5 天通電齡期試體; (c) 7 天通電齡期試體; (d) 3 天試體取出之鋼筋; (e) 5 天試體取出之鋼筋; (f) 7 天試體取出之鋼筋  
(資料來源：本研究拍攝)

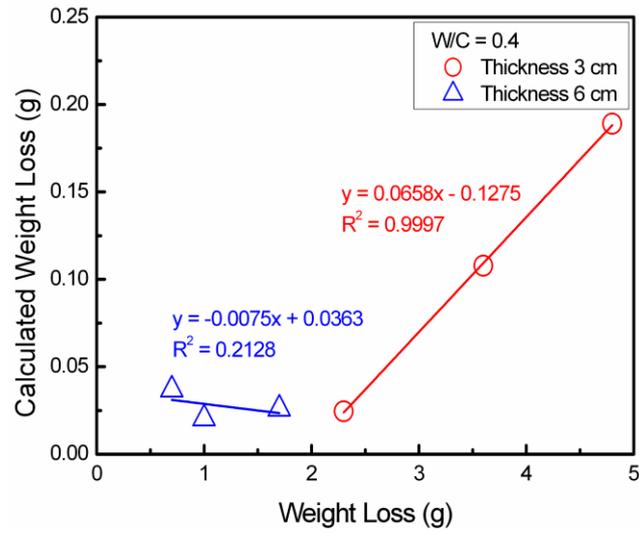


圖 3 - 21 不同保護層厚度下水灰比 0.4 試體之計算腐蝕量與重量損失間的關係

(資料來源：本研究試驗結果)

#### 肆、粗細粒料體積比

前述小試體試驗均使用砂漿，然而在混凝土構件中，保護層往往仍具有粗粒料，而粗粒料的吸水率、電阻等性質明顯與砂漿不同，故預期量測結果明顯不同。本研究使用的粗粒料的比重為 2.6，吸水率為 0.84，細粒料的比重為 2.68，吸水率為 1.3%，混凝土試驗的配比設計如表 3-15 所示。

試驗過程中固定水灰比 0.6 及保護層 6 cm 後，拌製混凝土試體並利用脈衝量測法探討粗細粒比例對腐蝕量測的影響，結果如表 3-6、表 3-16 至表 3-19 及圖 3-22 所示。

就混凝土試體而言，其計算腐蝕量低於重量損失，兩者間的係數約 3-6，比砂漿試體的量測結果更接近重量損失，可以說誤差減少，如表 3-19 所示。此結果並非預期，似乎非均質的混凝土反而獲得較可靠的結果。造成此差異的原因不明，推測可能是因添加粗粒料後，由於粒料與漿體界面的孔隙率較高，故量測電流較易經此通過，因此量測結果較可靠。但另一方面，當部份粗粒料僅被細粒料取代 1/3 時，量測結果似乎更接近重量損失，其係數更進一步下降至 3-4，原因為何有待後續研究。然而，當粗粒料被細粒料大量取代(取代率：1/2)時，其計算腐蝕量與重量損失兩者間的係數約界於 11-20 間，更近似於砂漿試體。實務上，混凝土的配比並不會使用如此高比例的細粒料，故根據本研究的成果，在水灰比 0.6 及保護層 6 cm 以下的條件下，即使是混凝土試體，其腐蝕量測應可得到可靠的結果。

表 3-15 混凝土配比設計(SSD) (單位：kg/m<sup>3</sup>)

粗粒料	細粒料	水泥	水
845	884	358	215

(資料來源：本研究整理)

表 3-16 水灰比 0.6、粗粒料被細粒料取代 1/2 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

通電時間	總通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	3.3745	3.1830	2.7601
第 2 天	4.4417	2.8367	10.7330
第 3 天	16.8375	12.3961	22.4120
第 4 天		18.6840	12.9315
第 5 天		10.8106	33.6865
第 6 天			42.5095
第 7 天			24.1750

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3-17 水灰比 0.6、粗粒料被細粒料取代 1/3 之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

通電時間	總通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	26.3213	33.6623	28.2523
第 2 天	24.9483	26.2590	26.0290
第 3 天	33.3313	37.0720	32.4210
第 4 天		26.3443	30.1316
第 5 天		28.4920	15.5036
第 6 天			29.6993
第 7 天			48.0040

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3-18 水灰比 0.6、混凝土之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測間距	通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	4.5614	4.1692	3.1670
第 2 天	42.7183	18.3050	29.4883
第 3 天	35.2850	33.8890	21.5373
第 4 天		40.5170	32.6880
第 5 天		54.4016	55.5673
第 6 天			38.2243
第 7 天			27.6943

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3 - 19 不同粗細粒料體積比下計算腐蝕量與重量損失之關係 (保護層厚度：6 cm)

通電時間 (days)	通電前重 (g)	除鏽後重 (g)	實際腐蝕量 (g)	計算腐蝕量 (g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
砂漿					
3	392.1	390.8	1.3	0.0844	15.39
5	395.0	392.7	2.3	0.1262	18.22
7	391.9	388.6	3.3	0.2207	14.95
以細粒料取代粗粒料 1/2 體積					
3	385.3	384.9	0.4	0.02029	19.71
5	387	386.2	0.8	0.05311	15.06
7	385.7	383.7	1.9	0.17134	11.09
以細粒料取代粗粒料 1/3 體積					
3	387.3	387.0	0.3	0.08489	3.53
5	387.2	386.7	0.5	0.17192	2.91
7	388.7	387.9	0.8	0.23247	3.44
混凝土					
3	383.5	383.1	0.4	0.08112	4.93
5	385.3	384.6	0.7	0.15505	4.51
7	388.2	386.8	1.4	0.24306	5.76

(資料來源：本研究試驗結果整理)

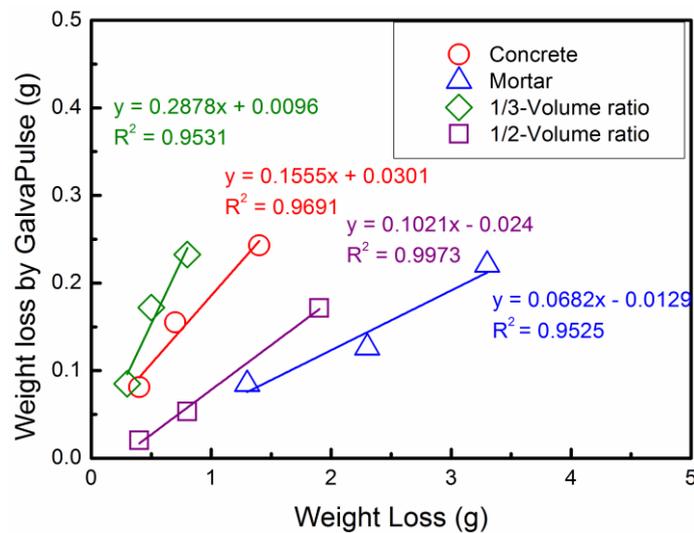


圖 3 - 22 不同粗細粒料體積下計算腐蝕量與重量損失間的關係(w/c=0.6, 保護層：6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

### 伍、含水率

自然狀態下，大多數鋼筋混凝土構件處於氣乾狀態，也就是混凝土本身的含水量可能隨時改變。由於腐蝕量測基於電化學反應，因此可預期試驗結果受試體含水量的影響，現地量測時宜先讓試體處於面乾內飽和態。然而，通常混凝土性質緻密，不易短時間達到面乾內飽和狀態，若呈現部份氣乾，腐蝕量測值如何受到其影響值得探討。

本研究利用真空烘箱來降低混凝土中的含水量，在常溫下使用真空環境可較迅速去除水份，為瞭解真空乾燥過程試體含水率的變化，於不同乾燥時間下利用水份計量測含水率及稱重計算重量損失，試驗結果如圖 3-23 及圖 3-24 所示。隨著乾燥時間越久，含水率減少，重量損失增加。不論試體有無含鋼筋，大約在乾燥時間 12 小時後達到穩定。此時含水率的變化大約由飽和狀態變化 2-7%，故本研究所使用的乾燥方式，應可模擬現地大多數局部氣乾的狀態。

本研究使用水灰比 0.6、保護層 6 cm 的砂漿試體，經加速通電時間 5 天，量測在不同乾燥時間下的腐蝕電流密度及含水率，試驗結果如圖 3-25 所示。隨著含水率越低，所量測的腐蝕電流密度較低且較不穩定，可能原因在於脈衝電流隨著含水率越低而更不穩定，而無法獲得準確的量測值。當含水率變化 5% 時，腐蝕電流密度約降低 20%，故含水率對腐蝕量測的影響甚大。此結果亦說明，於現地量測時，宜儘可能維持保護層面乾內飽和狀態。

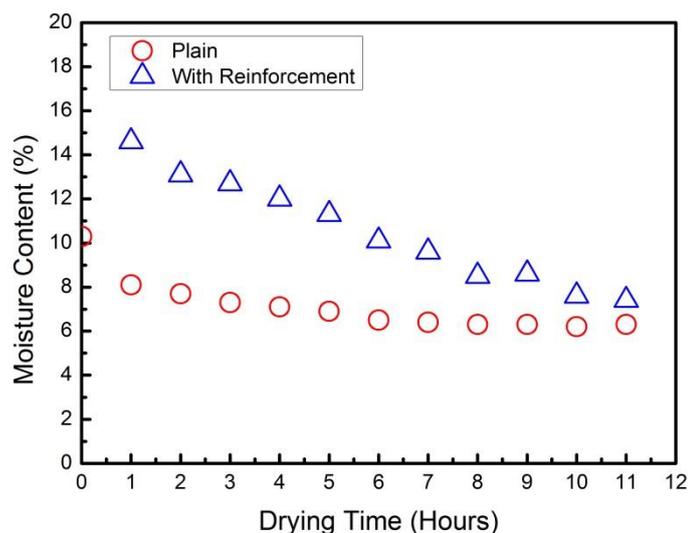


圖 3-23 含水率與乾燥時間的關係(水灰比 0.6、保護層 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

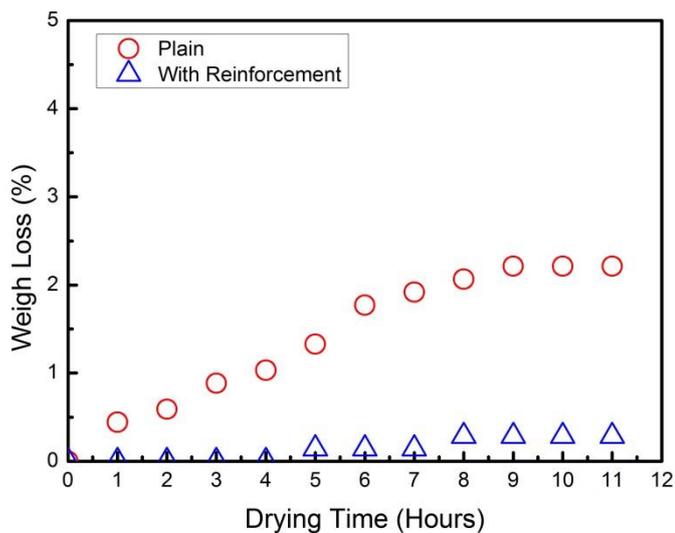


圖 3 - 24 重量損失率與乾燥時間的關係(水灰比 0.6、保護層 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

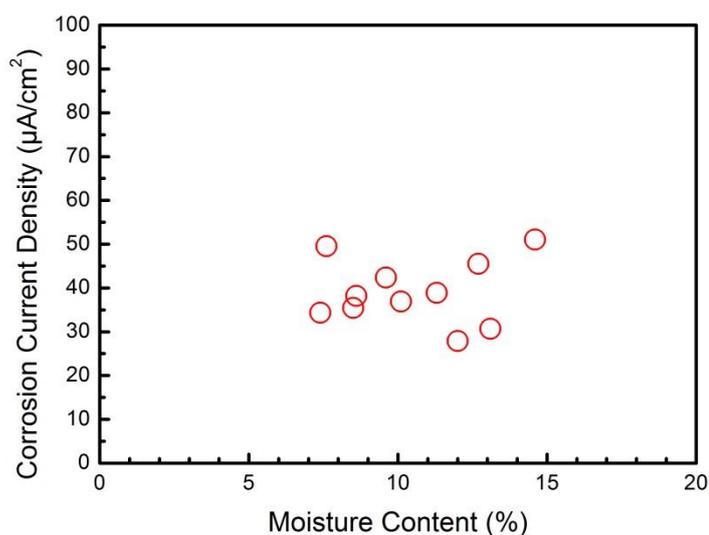


圖 3 - 25 腐蝕電流密度與含水率的關係(水灰比 0.6、保護層 6 cm、加速通電時間 5 天)

(資料來源：本研究試驗結果)

## 陸、鋼筋配置

本研究為探討箍筋對腐蝕量測的影響，試體設計如前述各節，水灰比固定在 0.6，主筋中心到量測面為 6 cm，並加入 D10(#3)鋼筋做為橫向鋼筋，再僅通電主筋，結果如表 3-20 及圖 3-26 所示。當箍筋存在時，其量測到的腐蝕電流密度都相當的低，約在  $4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以內。此外，其計算腐蝕量與重量損失間的正比關係明顯與無箍筋的試體不同，量測值不穩定且係數變化大，約 78-134，如表 3-21 所示。比較箍筋的重量損失可發現，箍筋本身鏽蝕的相當嚴重，至通電 7 天時的重量損失已經遠比主筋的重量損失多，係數 7 達以上。此結果說明了通電時主要的腐蝕發生在外側箍筋，亦接近現地的觀察結果。當外界有害離子侵入時，箍筋先鏽蝕。由於箍筋承擔了大部份鏽蝕，加上位處主筋上側，故可能造成量測電路上的阻抗增加，主筋的腐蝕電流量測值偏低。另一可能是，由於箍筋與主筋接觸，量測時有效量測面積增加，故腐蝕電流密度偏低。總而言之，箍筋的存在會影響主筋腐蝕的量測，不僅量測值較低且不穩定。

試體破壞後並取出鋼筋，如圖 3-27 所示。主筋與箍筋經長時間通電後均會鏽蝕，但似以箍筋較快達到均勻腐蝕。當主筋並非均勻腐蝕時，不完全符合儀器所假設之適用條件，故量測值較不可靠。

表 3 - 20 水灰比 0.6、含橫向鋼筋配置之鋼筋腐蝕電流密度 (單位： $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

通電時間	總通電時間		
	3 days	5 days	7 days
第 1 天	1.6806	1.7205	3.5559
第 2 天	0.9313	0.4497	0.5118
第 3 天	2.5802	0.8801	2.6412
第 4 天		0.5391	1.4583
第 5 天		2.3727	0.6140
第 6 天			1.9842
第 7 天			0.9480

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 3 - 21 橫向鋼筋存在下計算腐蝕量與重量損失之關係 (保護層厚度：6 cm)

通電時間 (days)	通電前重 (g)	除鏽後重 (g)	實際腐蝕量 (g)	計算腐蝕量 (g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
	<b>鋼筋-箍筋交錯</b>				
3	385.3	384.8	0.5	0.0048	102.543
5	384.3	383.5	0.8	0.0059	134.050
7	387.4	386.3	1.1	0.0140	78.322
	<b>箍筋重量損失</b>				
3	112.7	111.3	1.4		
5	112.9	107.4	5.5		
7	112.7	104	8.7		

(資料來源：本研究試驗結果整理)

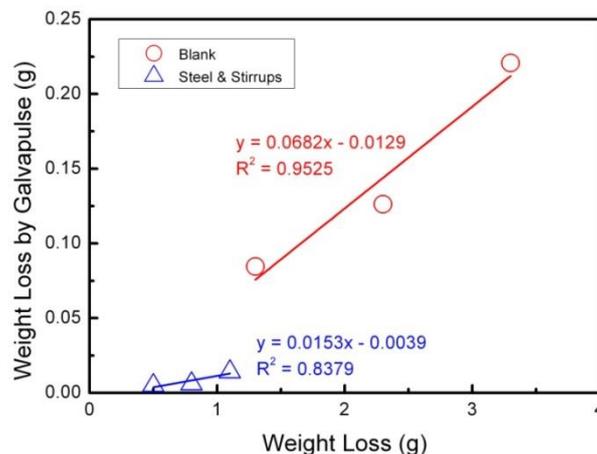


圖 3 - 26 橫向鋼筋存在下計算腐蝕量與重量損失間的關係(水灰比:0.6、主筋保護層厚度：6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

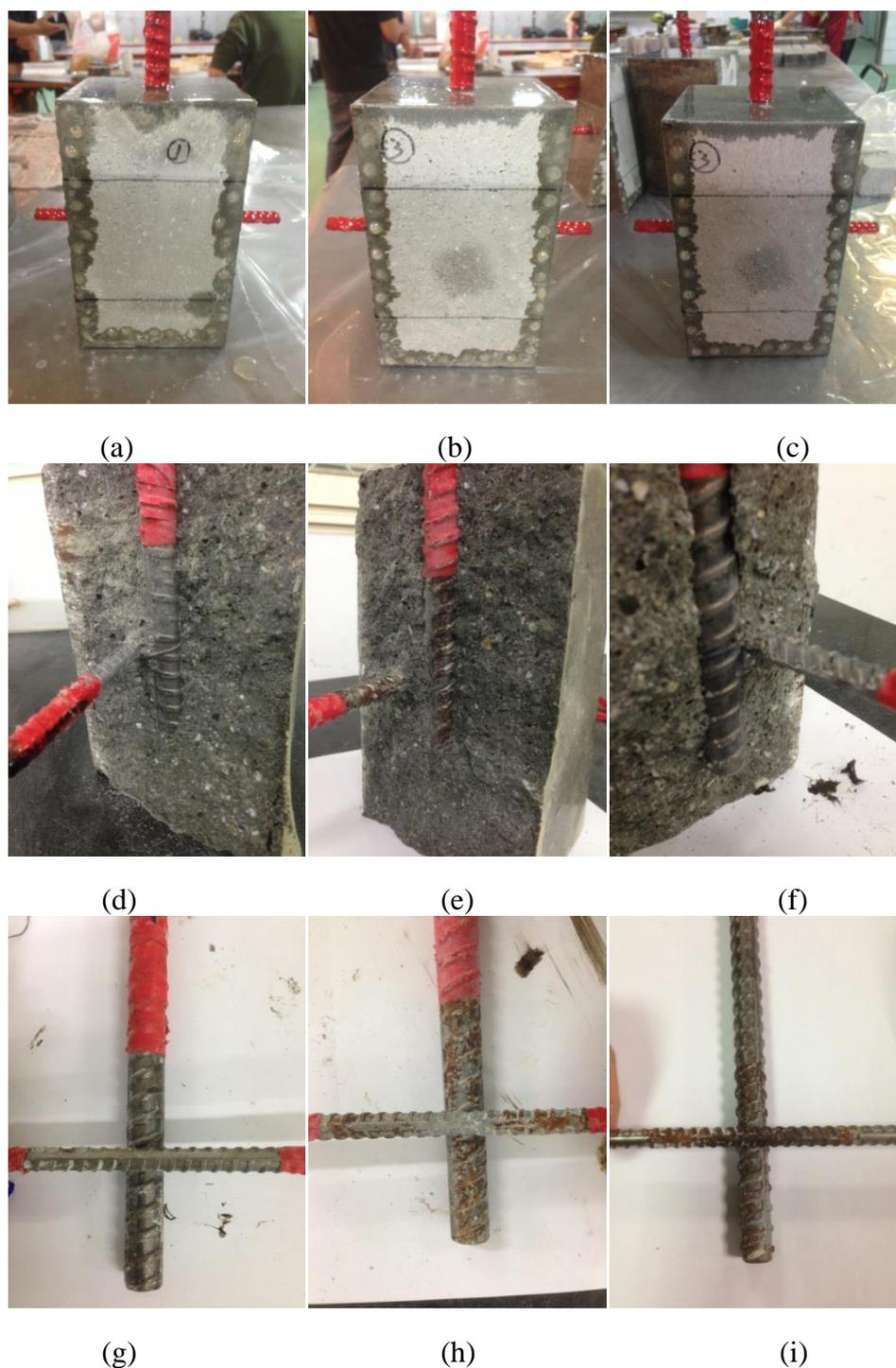


圖 3 - 27 水灰比 0.5 的含交錯鋼筋試體與取出鋼筋過程：(a) 3 天通電齡期試體；(b) 5 天通電齡期試體；(c) 7 天通電齡期試體；(d) 3 天試體鋼筋取出過程；(e) 5 天試體鋼筋取出過程；(f) 7 天試體鋼筋取出過程；(g) 3 天試體取出之鋼筋；(h) 5 天試體取出之鋼筋；(i) 7 天試體取出之鋼筋

(資料來源：本研究拍攝)

### 柒、脈衝電流與施加時間的影響

如圖 2-9 所示，脈衝腐蝕量測儀必須施加一微小脈衝電流於鋼筋，若能適度極化，則可利用其回應的電位變化估算極化阻抗，進而利用 Stern-Geary 方程式(式 2-8)來估算腐蝕電流密度。本研究參考儀器手冊說明，使用脈衝電流 100  $\mu\text{A}$ 、施加時間 10 秒鐘，此設定能普遍適用於量測鋼筋的活性區。然而，由於現地的鋼筋腐蝕狀態大多不同，可能處於鈍態區或嚴重活性區，該設定下儀器或許不能有效極化鋼筋，獲致正確的腐蝕電流密度。因此，本研究參考儀器手冊的說明及可設定範圍，嘗試瞭解脈衝電流的大小與施加的時間對量測值的影響。

如同前述之試驗，鋼筋分別通電 1、3、5 天後再利用脈衝腐蝕量測儀量測其腐蝕電流密度，過程中改變脈衝電流由 25  $\mu\text{A}$  變化到 200  $\mu\text{A}$ ，脈衝時間由 5 s 變化到 20 s，試驗結果如表 3-22 所示、圖 3-28 與圖 3-29 所示。當脈衝電流維持在 100  $\mu\text{A}$  時，改變脈衝時間的確會改變所量測的腐蝕電流密度。當腐蝕不嚴重時(通電時間 1 天)，量測值並沒有明顯改變。然而，當嚴重腐蝕時(通電時間 5 天)，較短或較長的脈衝時間皆得較高的量測值。較短的脈衝時間造成極化不足，數據不穩定。較長的極化時間反而加速鋼筋極化，故得較高的量測值。因此，由圖 3-28 的結果顯示，脈衝時間介於 10-15 秒尚屬合理。

另一方面，為探討脈衝電流大小對量測值的影響，故於固定脈衝時間的條件下，改變脈衝電流，結果如圖 3-29 所示。如同前述結果，當腐蝕不嚴重時(通電時間 1 天)，量測值並沒有明顯改變。然而，當嚴重腐蝕時(通電時間 5 天)，較小的脈衝電流並不能有效再極化鋼筋，因此所得的脈衝電流密度較低。隨著脈衝電流的增加，量測值也隨之增加。換言之，若要比較不同鋼筋的腐蝕電流密度，則宜在相同的脈衝電流施加下比較。由圖 3-29 的結果顯示，對於大多數混凝土中的鋼筋，其腐蝕狀態並非處於嚴重腐蝕，故脈衝電流約在 100  $\mu\text{A}$  應可得較穩定的量測值。

總而言之，以目前的試驗結果顯示，使用脈衝電流 100  $\mu\text{A}$  與脈衝時間 10 s 應可適當地極化多數的鋼筋，獲得穩定的量測值。倘若量測值不穩定，不考慮其它材料因素的條件下，很可能鋼筋腐蝕嚴重，似乎提高脈衝電流為可行的方向之一。

表 3 - 22 不同脈衝電流與施加時間下之鋼筋腐蝕電流密度

通電時間 (days)	脈衝電流 ( $\mu\text{A}$ )	脈衝時間 (s)	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
1	25	10	0.0800
	50	10	0.1023
	100	5	0.2479
		10	0.1164
		15	0.1718
		20	0.0962
	10	0.1569	
200	10	0.2152	
3	25	10	1.1858
	50	10	2.2029
	100	5	4.3122
		10	3.3647
		15	2.3787
		20	1.2979
	150	10	3.5912
200	10	3.7464	
5	25	10	1.7558
	50	10	2.6288
	100	5	7.2867
		10	5.5158
		15	5.0808
		20	6.4652
	150	10	6.9806
200	10	7.9849	

(資料來源：本研究試驗結果整理)

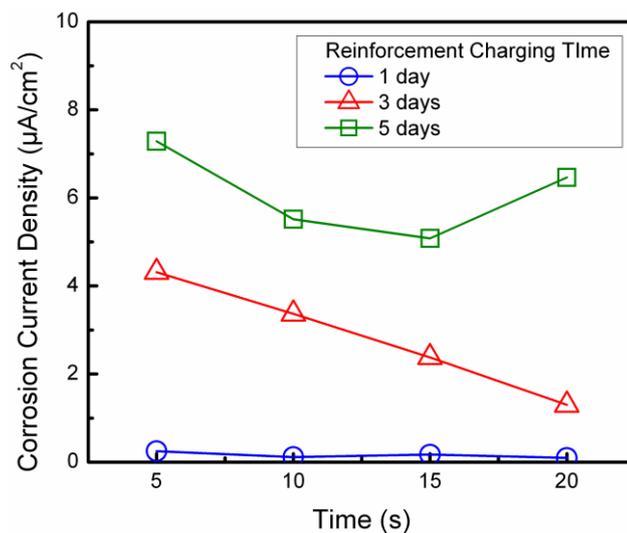


圖 3 - 28 不同通電時間下腐蝕電流密度與脈衝時間的關係(脈衝電流:100  $\mu\text{A}$  ,  $w/c=0.6$  , 保護層 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

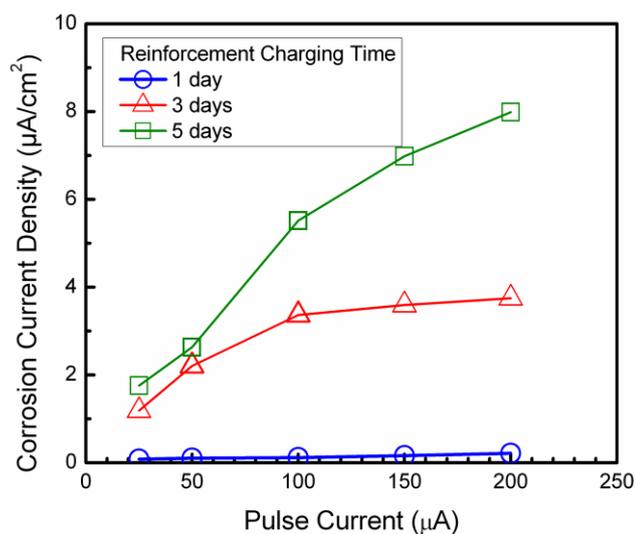


圖 3 - 29 不同通電時間下腐蝕電流密度與脈衝電流的關係(脈衝時間:10 s ,  $w/c=0.6$  , 保護層 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

### 捌、過電壓大小的影響

本研究除了使用脈衝極化法外，亦使用直流極化法量測小尺寸試體中鋼筋的腐蝕。直流極化法中必須施加一微小過電壓，一般為 $\pm 10$  mV，在此過電壓下，電流密度與過電壓約成線性關係(圖 2-5)，由斜率進而求得極化阻抗。然而，此過電壓的大小及兩次量測間的等待時間並未明確規範，因此本研究探討不同過電壓範圍及量測間隔時間對量測值的影響，包括 $\pm 5$  mV、 $\pm 10$  mV、 $\pm 15$  mV，量測不同腐蝕情況下(通電時間：1 天、3 天、5 天)鋼筋的腐蝕電流密度。

試驗結果如表 3-23、圖 3-30 與圖 3-31 所示。本研究所預定的量測間隔時間為 30 s，若改變量測時所使用的過電位，其量測值並無明顯變化(圖 3-30)。另一方面，量測間隔時間關係到量測值的穩定性，每施加一微小過電位，亦即施加於系統一小擾動，故兩量測之間必須具適當間隔時間。當間隔時間越少時，其量測值略為提高(圖 3-31)，但整體而言變化不大，本研究中多採取間隔時間 30 s，尚屬合理。

相較於脈衝量測法，直流極化法中所使用的過電壓與量測間隔時間的改變對量測值的影響較小，很可能因為在前述之變化範圍內，外加電壓並不會造成系統的嚴重擾動，因此所量測值穩定且可靠。然而，如同前述，由於本研究中直流極化法所使用的電極相較於鋼筋小，所以量測值誤差較大。即使如此，由於量測值與實際重量損失仍成正比，故仍可以利用計算值推估腐蝕量。

表 3 - 23 不同過電壓與量測間隔時間下之鋼筋腐蝕電流密度

通電時間 (days)	過電壓 (mV)	間隔時間 (s)	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
1	$\pm 5$ mV	30	0.4865
	$\pm 10$ mV	10	0.4228
		20	0.3752
		30	0.4947
		60	0.3049
3	$\pm 5$ mV	30	1.2883
	$\pm 10$ mV	10	1.3477
		20	1.1999
		30	1.1555
		60	1.0544
	$\pm 15$ mV	30	1.0388
5	$\pm 5$ mV	30	2.3063
	$\pm 10$ mV	10	2.4550
		20	2.3197
		30	2.1366
		60	2.1653
	$\pm 15$ mV	30	2.0223

(資料來源：本研究試驗結果整理)

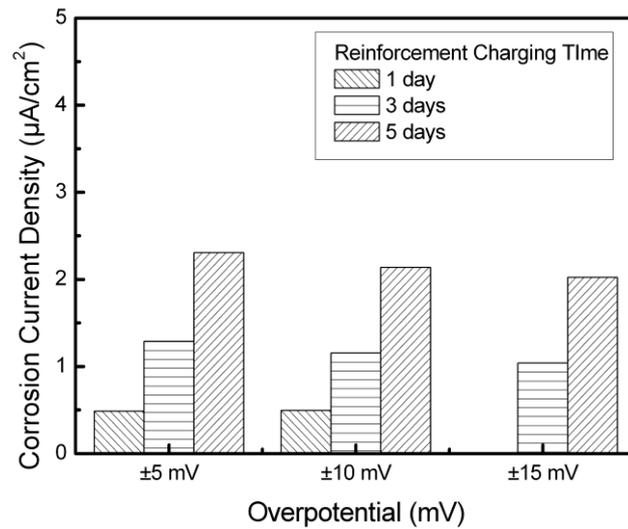


圖 3 - 30 不同通電時間下腐蝕電流密度與過電位的關係(量測間隔時間：  
30 s，w/c=0.6，保護層 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

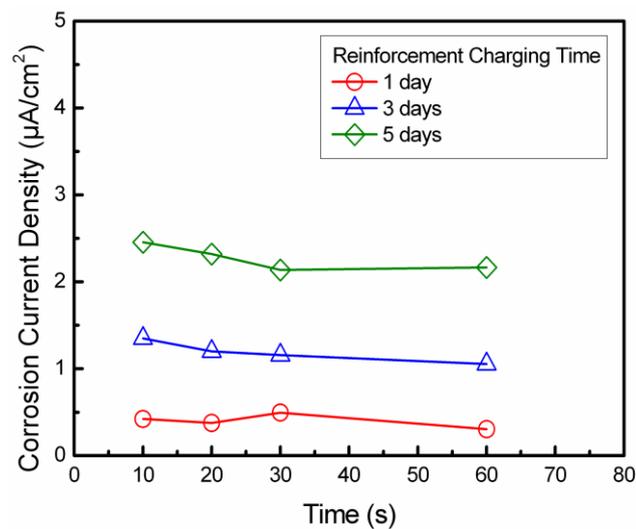


圖 3 - 31 不同通電時間下腐蝕電流密度與量測間隔時間的關係(過電壓：  
±10 mV，w/c=0.6，保護層 6 cm)

(資料來源：本研究試驗結果)

## 玖、氯離子分佈與鋼筋腐蝕量間的關係

由於一般鋼筋混凝土中，鋼筋受到混凝土的保護，在鹼性孔隙溶液中處於鈍態，故腐蝕速率低。本研究為了有效探討電化學量測的方式，過程中採用加速腐蝕，其方法為將試體置於鹽水中，再通電加速腐蝕。氯離子一方面作為導電通路所需之帶電離子，一方面當其接觸到鋼筋表面時，可誘發孔蝕，加速鋼筋的腐蝕。自然環境中，尤其是濱海地區，建築構造物常年受到海風吹拂，因此容易在表面產生氯鹽沉積的現象，氯離子再藉由擴散方式進入混凝土內部，造成鋼筋腐蝕。目前現地評估中，多量測混凝土中的氯離子含量以為評估指標。然而，文獻中仍未明確指出氯離子含量與鋼筋腐蝕間的關係。影響鋼筋腐蝕的因子除了包括氯離子外，尚包括孔隙溶液的酸鹼值，氧氣量等，因此氯離子含量不見得可完全反應鋼筋的腐蝕狀態，本研究也因此嘗試連結鋼筋腐蝕量與氯離子量的量測結果，期能找出兩者之間可能的關係。

試驗結果如圖 3-32 所示，多數為砂漿試體，保護層分別為 3 cm 與 9 cm，其中試體之一含箍筋，另一試體為混凝土試體，以細粒料取代 1/3 的粗粒料體積。結果可明顯發現，氯離子含量不完全與鋼筋腐蝕量成正比。當箍筋存在時，所量得的腐蝕量較低，氯離子含量幾乎與腐蝕量呈反比關係，很可能因為箍筋本身腐蝕且疊置於主筋上方，故不能準確量測主筋的腐蝕。此外，當粗粒料存在時，氯離子含量與腐蝕量幾無關係，很可能粗粒料的存在改變氯離子的分佈。換言之，即使在現地所量測的混凝土中氯離子含量高，並不意味著鋼筋腐蝕速率或鋼筋腐蝕量高，亦即必須進行腐蝕量測才能更準確評估鋼筋的腐蝕狀態。

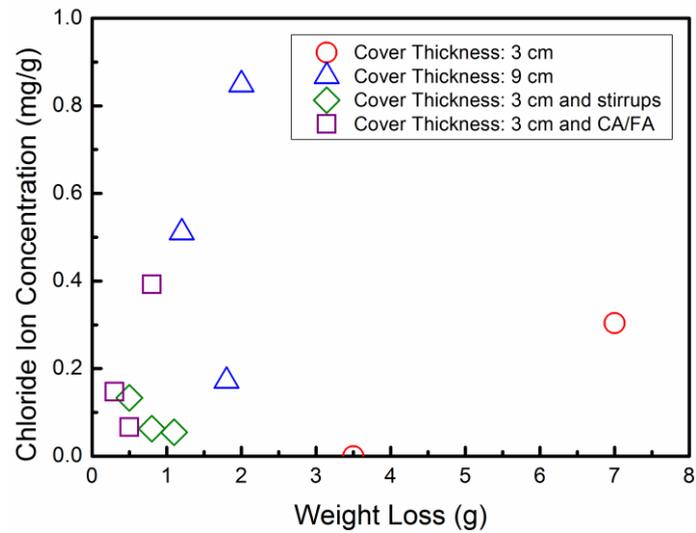


圖 3 - 32 不同保護層厚度、箍筋存在、粗細粒料體積比下砂漿中氯離子含量與鋼筋腐蝕量間的關係(w/c=0.6)

(資料來源：本研究試驗結果)



## 第四章 足尺寸構件試體試驗

### 第一節 柱設計方法及檢核

#### 壹、試體設計

本研究中的足尺寸試體以韌性構材設計，係參考國內中小學建築耐震研究的相關報告，再從中挑選並組成具代表性之柱斷面尺寸、材料強度及配筋細節，配筋細節與材料強度則依據當前的設計主流採用較大號鋼筋，混凝土抗壓強度設計值採用 280 kgf/cm<sup>2</sup>，鋼筋抗拉強度設計值採用 4200 kgf/cm<sup>2</sup>，其梁主筋採 8-D25(#8)，橫向鋼筋採 D13(#4)，箍筋間距共分為二種，分別為 10、15 公分，彎鉤採 135 度，另外一種則為無配置箍筋，試體參數設計參見表 4-1，柱試體之設計則見於圖 4-1，所使用的試體設計有助於探討不同箍筋間距下量測主筋腐蝕的技術。

圖 4-1 為足尺寸梁試體的設計圖，彎鉤採 135 度之閉合箍筋，第一組試體的垂直間距為 10 cm，第二組試體的垂直間距為 15 cm 而第三組試體並無配置閉合箍筋，該試體設計有助於探討箍筋間距及有無閉合箍筋的條件下主筋的腐蝕量測技術。

表 4-1 試體參數設計

試體種類	箍筋配置 A	箍筋配置 B	箍筋配置 C
混凝土抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	280	280	280
鋼筋降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	4200	4200	4200
主筋配置	8-#8	8-#8	8-#8
橫向鋼筋配置	#4@10 cm 135 度彎鉤	#4@15 cm 135 度彎鉤	無配置 橫向鋼筋

(資料來源：本研究設計)

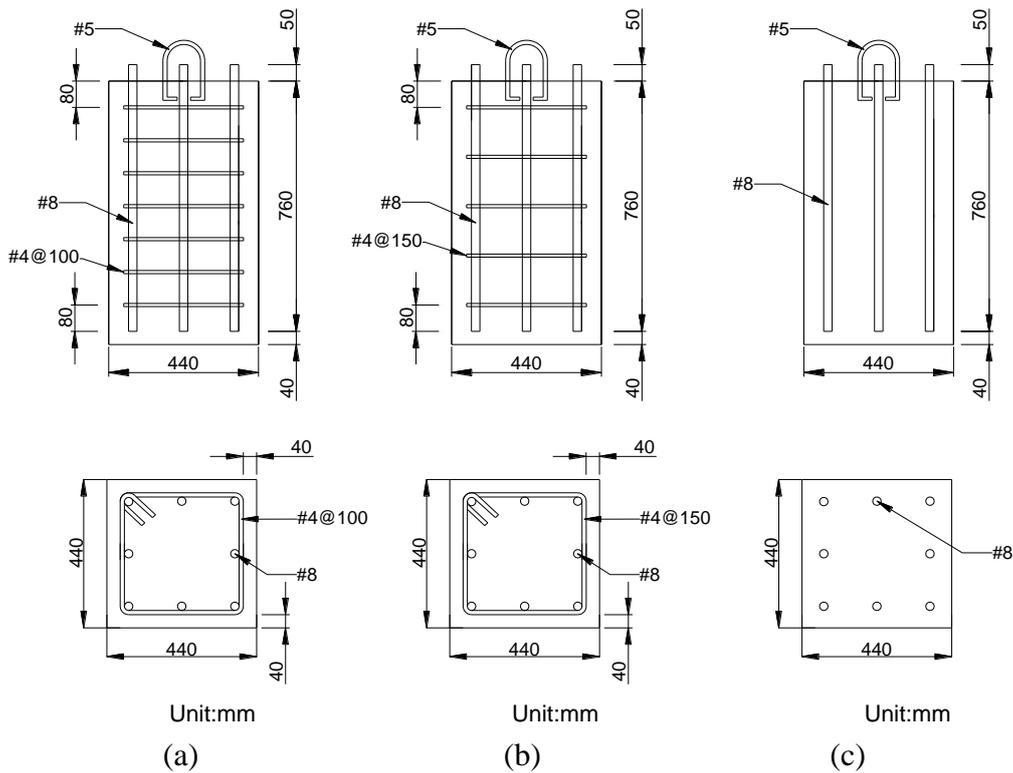


圖 4-1 腐蝕足尺寸梁試體設計圖

(資料來源：本研究繪製)

## 貳、檢核材料強度

### (1) 混凝土抗壓強度

抗壓強度的設計係依據土木 401-96 設計規範，混凝土之規定抗壓強度  $f'_c$  不得低於  $210 \text{ kgf/cm}^2$ ，故本試體混凝土之規定抗壓強度  $f'_c$  採  $280 \text{ kgf/cm}^2$ 。

### (2) 耐震構材之鋼筋

鋼筋的性質要求係依據土木 401-96 設計規範，用以承受地震引致之彎矩與軸力之構架構材及結構牆之邊界構件時，其主筋應符合 CNS 560 中 SD 420W 及 SD 280W 之要求。CNS 560 中 SD 420 及 SD 280 鋼筋亦可使用，惟應符合下列規定：

- (a) 實測降伏強度不得超出規定降伏強度  $f_y$  達  $1200 \text{ kgf/cm}^2$  以上。
- (b) 實測極限抗拉強度與實測降伏強度之比值不得小於 1.25。
- (c) 與橫向鋼筋包括螺箍筋之  $f_t$  不得超過  $4200 \text{ kgf/cm}^2$ 。

根據以上規定，本試體中鋼筋採 SD420W，標稱降伏強度為  $4200 \text{ kgf/cm}^2$ 。

## 參、設計柱斷面

## (1) 承受撓曲與軸向載重之構件的範圍

依據土木 401-96 (2007)設計規範，所探討承受彎矩之構件須符合下列規定：

- (d) 設計軸壓力不超過  $0.1A_g f'_c$ 。
- (e) 斷面之最小尺度不得小於 30 cm。
- (f) 斷面最小尺度與其垂直尺度之比不得小於 0.4。

本研究中試體柱寬 44 cm，斷面最小尺度與其垂直尺度之比為 1，符合上列規範。

## (2) 縱向鋼筋

- $0.01 A_g \leq \text{縱向鋼筋面積 } A_{st} \leq 0.06 A_g$ 。

柱斷面為 44 cm×44 cm，主筋為 8 支#8 鋼筋

柱斷面積  $A_g = 44 \times 44 = 1936 \text{ cm}^2$

縱向鋼筋面積  $A_{st} = 8 \times 5.07 = 40.56 \text{ cm}^2$

$0.01 A_g = 19.36 \text{ cm}^2$

$0.06 A_g = 116.16 \text{ cm}^2$

本試體採 8 支#8 鋼筋，符合上述規定。

## (3) 橫向鋼筋

依據土木 401-96 設計規範，矩形閉合箍筋用量需滿足以下規定：

- (a) 矩形閉合箍筋及繫筋之總斷面積  $A_{sh}$  不得小於以下式子：

$$A_{sh} = 0.3sb_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \quad (4-1)$$

$$A_{sh} = 0.09sb_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (4-2)$$

其中  $s$  = 橫向鋼筋的間距； $b_c$  = 外緣圍束鋼筋中心至中心的間距； $f'_c$  = 混凝土規定軸壓強度； $f_{yt}$  = 橫向鋼筋的規定降服強度； $A_g$  為鋼筋混凝土總斷面積； $A_{ch}$  為橫向鋼筋外緣以內的構件斷面積。

以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究

$$A_{ch} = (44 - 4 \times 2)^2 = 1296 \text{ cm}^2$$

$$A_{sh} = 0.3s_b c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) = 0.3 \times 10 \times 34.73 \times \frac{280}{4200} \left( \frac{1936}{1296} - 1 \right) = 3 \text{ cm}^2$$

$$A_{sh} = 0.09s_b c \frac{f'_c}{f_{yt}} = 0.09 \times 10 \times 34.73 \times \frac{280}{4200} = 2 \text{ cm}^2$$

提供之量  $A_{sh} = 3 \text{ cm}^2$ ，符合上述規定。

b. 橫向鋼筋之間距不得超過以下規定：

- 構件斷面最小尺度之 1/4。
- 最小主鋼筋直徑之 6 倍。
- $10 \text{ cm} \leq 10 \text{ cm} + \left( \frac{35 \text{ cm} - h_x}{3} \right) \leq 15 \text{ cm}$ 。其中  $h_x$  = 沿柱各邊相鄰箍筋或繫筋間最大水平距離。
- 繫筋或閉合箍筋相鄰各肢之中心距  $h_x$  不得超過 35 cm。

構件斷面最小尺度之 1/4 =  $44/4 = 11 \text{ cm}$

最小主鋼筋直徑之 6 倍 =  $6 \times 2.54 = 15.24 \text{ cm}$

箍筋水平間距最大  $h_x$  約為 35 cm

$$10 + \left( \frac{35 - h_x}{3} \right) = 10 + \left( \frac{35 - 35}{3} \right) = 10 \text{ cm}，不可大於 15 \text{ cm}，也不可小於 10 \text{ cm}。$$

最大水平箍筋間距不超過 35 cm

本研究中試體閉合箍筋的垂直間距為 10 cm，符合上述規定。其外周主鋼筋須有橫向支撐，在各角隅處之主鋼筋及每隔一根主鋼筋，均須以閉合箍筋之轉角或繫筋之彎鉤作橫向支撐，閉合箍筋之內轉角不得大於  $135^\circ$ 。主鋼筋若無前述之箍筋作橫向支撐者，其與相鄰鋼筋之淨距不得大於 15 cm。主鋼筋排列成圓形時，可用完整圓形橫箍。

## 肆、加速腐蝕試驗之工具簡介

本試驗所使用之材料包括氯化鈉、氯化鉀及銅板等，各組成材料之來源及基本性質如下：

### 1. 氯化鈉(NaCl)

同小尺寸試體試驗，本試驗使用之氯化鈉為臺鹽實業股份有限公司所生產的高級精鹽，氯化鈉含量達 99.5 % 以上，碘酸鉀 20-35 ppm，主成分為氯化鈉(NaCl)，無特殊成分。於本試驗用用於鋼筋通電時之電解液。如圖 4 - 2(a)所示，

### 2. 氯化鉀(KCl)

同小尺寸試體試驗，用於電極之及保存液，使用狀況如圖 4 - 2(b)所示。

### 3. 銅板

本試驗使用為鋅與銅合金黃銅板。因銅擁有良好的導電性，故使用此材料作為整體通路的負極，使腐蝕能順利進行。如圖 4 - 2(c)所示。

### 4. 電源供應器

同小尺寸試體試驗，但規格較為不同，一台電源供應器可同時提供兩個電路使用，如圖 4 - 2(d)

- (1) GPS-3060D0 - 30V, 0 - 60A (電壓電流可切換顯示)。
- (2) 高調節率 0.01 % 可選擇連續或動態負載。
- (3) 固定電壓與固定電流操作功能且低漣波與低雜訊。
- (4) 具串聯或並聯操作模式過載與極性反向保護功能。

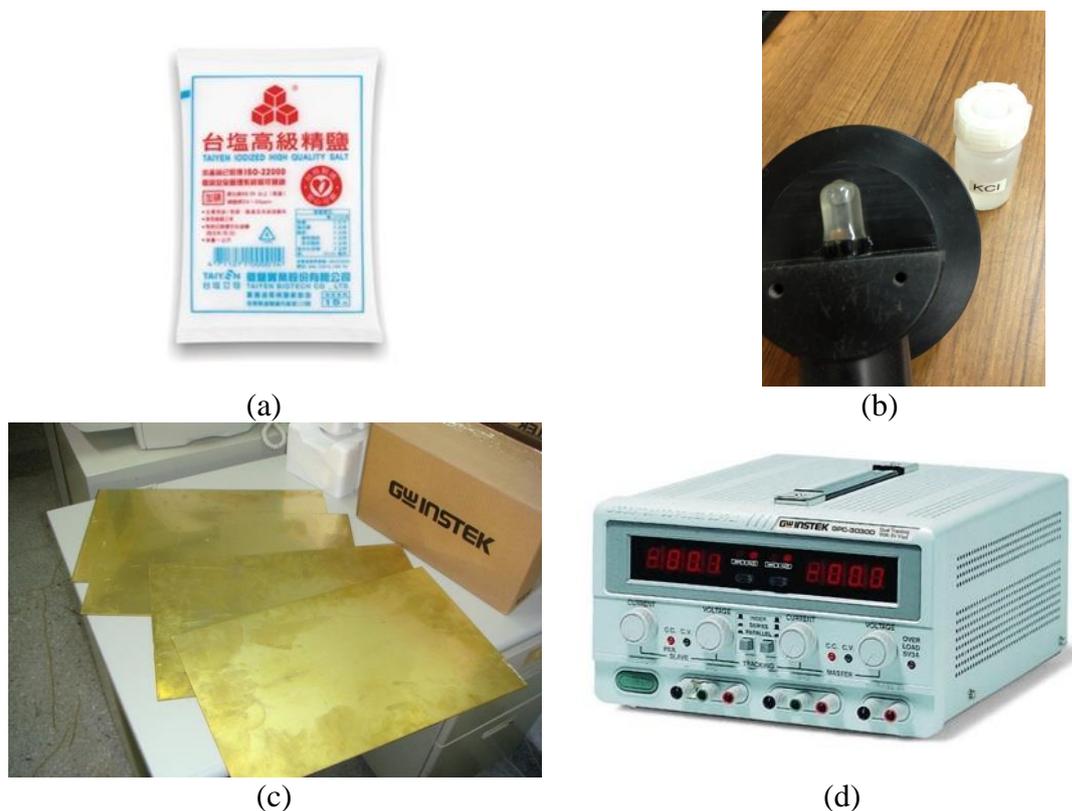


圖 4-2 腐蝕用儀器工具：(a) 台鹽高級精鹽；(b)飽和氯化鉀溶液；(c) 銅板；(d)電源供應器

(資料來源：本研究拍攝)

### 伍、材料基本性質測試

混凝土圓柱抗壓試體養護第 28 天及加速腐蝕試驗進行至第 4 天時之混凝土抗壓強度數值，如表 4-2 所示。

表 4-2 混凝土抗壓試驗結果

時間	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
28 天	357.36	329.20
	336.67	
	293.57	
進行加速腐蝕試驗 第 4 天	356.53	346.58
	323.86	
	359.36	

(資料來源：本研究試驗結果整理)

## 第二節 腐蝕鋼筋柱構件試體製作

### 壹、腐蝕鋼筋柱構件試體製作過程

本研究主要探討鋼筋腐蝕量量測的影響因子，故在組鋼筋籠之前，必須先量測各個主筋腐蝕前的原始重量，作為腐蝕後量測鋼筋重量損失之依據。為了將來通電需要，於纏綁電線前先使用砂輪機將鋼筋刻出一凹槽用來固定纏綁處之用，而該電線纏綁處為縱向鋼筋頂部之裸露處。

腐蝕試驗進行前必須先量測柱之縱向鋼筋及橫向鋼筋之原始重量，接著組立鋼筋籠及模板並確認與設計圖尺寸相符，於確認混凝土流度試驗值後方才進行灌漿。灌漿時使用振動棒搗實以減少蜂窩的情形發生，拆模前以澆水養護，拆模後將試體浸置於水槽養護共養護 28 天，相關製作過程如圖 4-3 所示。



圖 4-3 試體製作過程：(a)綁紮情況與模板設置；(b)混凝土流度試驗；  
(c)試體灌漿；(d)振動棒搗實；(e)試體灌漿完成；(f)圓柱抗壓試  
體灌漿完成；(g)養護試體  
(資料來源：本研究拍攝)

## 貳、加速腐蝕試驗

本研究加速鋼筋腐蝕的方式係採用外加電流將鋼筋電解強迫腐蝕，柱構件腐蝕區域涵蓋整體，設置如圖 4-4 所示。接著將柱構件表面繪製網格並標示鋼筋位置後，直立放置水槽中，並添加 3.5 % NaCl 溶液。在試體每一面放置銅板，再以一直流電源供應器負極接於放置水中之銅板，正極依序分別接於頂部每一支裸露之縱向鋼筋處纏綁之銅線，故電源供應器皆單獨接到一支縱向鋼筋上通電腐蝕，電流施加大小則為 0.55 A 並持續通電約 7 天，實際設置情形如圖 4-5 所示。

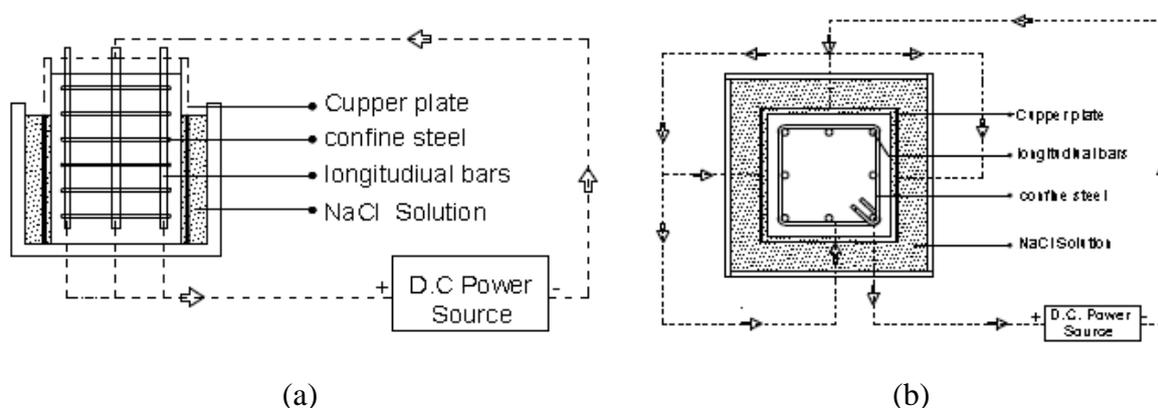


圖 4-4 足尺寸加速腐蝕試驗設置示意圖：(a)側視圖；(b)上視圖  
(資料來源：本研究繪製)



圖 4-5 加速腐蝕試體實際通電設置  
(資料來源：本研究拍攝)

### 第三節 試驗結果

#### 壹、足尺寸 I 柱腐蝕情形

如前節所述(I 柱為箍筋間距 10 cm 之柱),足尺寸試體與小尺寸試驗採用相同的  $1 \text{ mA/cm}^2$  腐蝕電流密度,即以 0.55 安培之總電流通電,接著進行連續 7 天的監測。可以發現,整體腐蝕速率至第四天開始就逐漸上升,期間也會有突然上升之現象。首先就個別鋼筋探討,當圖形些微上升時,代表鋼筋隨著時間增加而增加腐蝕,突然升高的結果表示該鋼筋可能逸出鏽水,形成通路之位置開始發生嚴重局部鏽蝕。當此位置的鋼筋表面鏽了大部份之後,則鏽蝕情形便開始減緩。估計 C 號主筋的行為僅在形成通路階段,所以當試驗後期時,內部的鏽水已產生,但還不足以形成通路。其它七根主筋皆發生了局部鏽蝕情形,結果如表 4-3 至表 4-11 及圖 4-7 至圖 4-14 所示。另外,本次試驗的量測計算值與真實重量損失兩者間的係數不超過 5,其結果的精準度相當的高,與小尺寸混凝土試體的結果相符。

本研究將量測位置分為二類,包括有箍筋處及無箍筋處,由上而下依序標號, I 柱與 III 柱之每根主筋皆量測十三個點位,而 II 柱量測點為九個,如圖 4-6 所示。奇數點位標示於該柱左側鋼筋,偶數點位則在右側鋼筋表示,實際量測時如中間鋼筋之虛線所示,包含了奇數及偶數的所有點位。

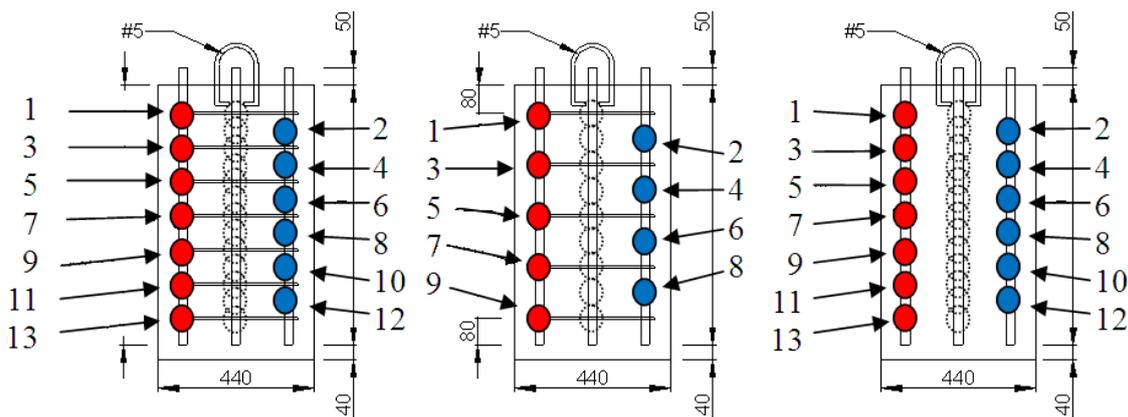


圖 4-6 量測點位說明

(資料來源：本研究繪製)

表 4-3 足尺寸 I 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
A-1	0.345	0.534	0.538	0.748	12.522	65.697	5.404
A-2	0.461	0.667	0.907	1.272	8.115	22.029	40.704
A-3	11.356	1.131	1.146	1.781	100.090	14.622	11.252
A-4	0.931	0.677	1.049	0.756	70.156	12.496	10.680
A-5	0.806	1.293	0.939	0.854	6.565	1.172	8.181
A-6	1.002	0.775	0.716	1.162	32.410	1.498	8.356
A-7	1.483	0.973	0.903	0.869	15.544	1.312	5.416
A-8	1.218	1.118	1.504	0.874	9.399	1.934	8.676
A-9	1.223	1.153	1.566	1.400	9.839	0.672	5.112
A-10	1.426	1.149	1.198	0.959	6.372	1.259	6.447
A-11	1.303	0.663	0.804	1.017	4.544	0.526	8.611
A-12	1.029	0.824	0.685	0.703	4.176	0.531	7.257
A-13	0.764	0.634	0.601	0.496	5.222	0.565	14.646

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-4 足尺寸 I 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
B-1	0.710	0.643	0.628	0.915	16.568	6.016	12.939
B-2	0.696	0.764	0.847	1.655	13.292	11.611	14.152
B-3	0.776	1.120	1.692	5.151	21.896	14.886	14.641
B-4	0.985	0.690	1.401	4.932	14.141	16.314	13.888
B-5	1.776	1.408	1.160	2.641	65.467	12.166	10.237
B-6	2.270	2.079	1.874	2.493	4.536	11.147	8.182
B-7	2.065	2.983	5.295	2.889	13.679	2.348	7.481
B-8	2.808	1.484	1.965	1.452	28.925	8.153	6.658
B-9	3.061	3.545	6.257	2.216	13.035	7.169	8.734
B-10	2.776	1.369	2.030	1.914	17.562	16.686	8.904
B-11	2.179	2.419	1.645	1.402	16.422	13.775	12.596
B-12	1.571	1.571	1.035	1.207	12.268	11.092	17.380
B-13	1.123	0.885	1.075	0.944	6.197	9.795	14.166

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-5 足尺寸 I 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
C-1	0.627	0.566	0.613	0.640	12.722	6.176	4.789
C-2	0.975	0.510	0.791	1.021	1.561	15.230	12.107
C-3	0.840	0.715	1.551	1.334	7.751	14.350	11.401
C-4	26.079	0.701	0.789	0.864	12.434	13.095	5.594
C-5	1.095	0.565	1.659	1.789	9.216	13.871	11.439
C-6	1.751	0.796	2.811	3.318	20.509	12.996	12.377
C-7	1.978	1.886	2.317	1.940	10.769	7.906	7.690
C-8	1.778	1.928	2.459	2.313	16.225	6.026	7.501
C-9	2.039	1.306	1.375	0.654	12.254	6.472	12.223
C-10	2.062	1.039	1.512	1.227	8.795	6.737	9.350
C-11	1.778	1.182	1.412	1.837	6.552	8.732	9.721
C-12	1.618	0.840	1.329	1.615	5.425	6.558	15.954
C-13	1.248	0.882	1.263	1.388	3.661	9.636	4.777

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-6 足尺寸 I 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
D-1	0.653	0.547	0.670	0.814	68.007	1.434	6.857
D-2	0.955	0.916	0.935	1.208	21.915	33.429	15.307
D-3	1.086	1.223	1.726	2.965	21.458	25.104	12.144
D-4	1.366	1.239	3.116	8.872	82.236	3.637	16.241
D-5	1.567	1.740	4.853	11.006	17.678	8.194	23.198
D-6	1.427	1.905	3.503	17.031	23.649	13.266	15.330
D-7	1.423	1.647	3.806	3.511	46.021	28.098	16.110
D-8	1.717	1.382	4.452	9.370	54.490	24.775	7.511
D-9	1.443	1.779	3.146	6.577	3.942	8.904	13.497
D-10	4.370	1.284	2.334	8.525	9.710	17.126	9.861
D-11	2.256	2.098	4.798	11.648	27.089	7.151	17.744
D-12	1.946	2.406	5.767	9.095	96.348	30.802	12.550
D-13	1.718	1.813	9.539	16.109	25.089	16.674	15.729

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-7 足尺寸 I 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
E-1	0.842	1.323	1.273	1.192	28.117	3.581	12.871
E-2	1.106	0.851	1.549	3.193	7.996	3.951	11.247
E-3	1.112	1.085	2.049	6.886	49.798	30.829	9.629
E-4	1.273	1.479	2.817	2.937	12.139	44.268	7.634
E-5	1.450	1.561	2.529	8.634	67.479	37.164	17.984
E-6	1.504	1.741	3.874	17.176	13.322	20.566	20.857
E-7	1.795	2.047	2.591	10.320	52.024	20.888	9.376
E-8	1.689	1.987	5.794	7.884	14.052	38.595	16.576
E-9	1.905	1.732	5.463	21.042	45.341	26.673	6.619
E-10	1.895	2.182	16.629	4.873	26.703	10.210	5.691
E-11	1.965	2.614	3.197	7.193	4.291	53.792	7.443
E-12	1.731	2.363	6.059	5.703	18.634	15.802	4.223
E-13	1.616	2.468	0.940	6.385	11.468	32.989	20.629

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-8 足尺寸 I 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
F-1	0.984	0.723	1.032	1.487	1.497	4.940	0.447
F-2	0.875	0.775	1.652	2.362	2.755	3.590	0.945
F-3	1.034	0.796	3.522	1.958	2.604	8.924	5.217
F-4	1.390	1.145	3.424	4.908	6.429	12.815	8.062
F-5	1.298	1.048	1.580	7.263	9.340	9.967	7.708
F-6	1.684	1.308	1.532	5.948	13.774	24.166	9.485
F-7	1.326	1.281	1.692	9.463	27.934	16.077	9.700
F-8	1.508	1.209	2.383	9.005	22.126	13.322	5.416
F-9	1.400	1.439	2.346	5.077	37.588	18.891	13.254
F-10	4.125	1.260	2.477	10.742	5.664	37.711	9.510
F-11	1.240	1.229	1.968	3.373	14.530	5.312	6.853
F-12	1.769	1.445	2.184	2.581	17.121	60.870	12.401
F-13	1.240	1.530	3.409	7.185	11.929	13.006	5.814

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-9 足尺寸 I 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
G-1	1.063	0.643	1.177	0.940	4.030	7.791	2.020
G-2	0.876	0.848	1.930	2.752	18.317	5.197	7.243
G-3	2.113	1.080	2.660	2.830	23.258	19.721	7.922
G-4	1.239	1.367	4.768	8.670	2.560	28.597	5.827
G-5	1.608	0.963	5.736	5.488	13.561	6.711	14.020
G-6	1.526	1.835	5.866	39.072	10.337	7.942	6.088
G-7	2.981	2.007	20.349	2.027	88.092	17.412	9.758
G-8	1.580	1.396	6.146	14.199	21.197	16.189	8.920
G-9	1.834	2.493	5.735	6.054	4.428	16.988	6.634
G-10	3.091	2.230	5.546	13.394	12.044	14.799	17.983
G-11	2.248	1.084	2.450	6.692	16.697	15.625	5.830
G-12	1.738	1.636	3.070	7.480	5.873	20.407	14.404
G-13	1.701	1.541	4.238	8.128	9.318	7.490	8.359

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-10 足尺寸 I 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
H-1	0.670	0.591	0.856	0.934	6.151	5.640	5.567
H-2	1.024	0.780	1.487	1.645	9.309	11.114	12.315
H-3	1.421	1.175	2.277	2.487	20.884	8.262	12.010
H-4	1.204	1.260	2.286	5.881	10.551	9.508	8.893
H-5	1.217	0.896	2.906	7.610	2.631	18.738	5.770
H-6	1.297	1.113	1.254	6.155	25.659	19.766	10.074
H-7	1.182	1.340	5.540	11.188	15.793	27.114	3.465
H-8	1.377	1.344	6.731	13.412	35.634	23.365	29.881
H-9	1.491	1.301	6.736	5.923	35.954	34.917	10.052
H-10	1.285	1.007	4.708	5.255	42.431	53.500	7.649
H-11	1.194	1.503	2.672	4.394	14.188	15.909	6.797
H-12	1.315	1.771	6.765	11.844	18.103	11.277	7.981
H-13	1.238	1.420	6.052	6.106	42.125	23.749	7.983

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-11 足尺寸 I 柱計算腐蝕量與重量損失之關係

I 柱	原始重(g)	除鏽後重(g)	實際腐蝕量(g)	計算腐蝕量(g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
A	3271	3253	18	4.3835	4.106
B	3193	3181	12	4.4904	2.672
C	3197	3181	16	3.2879	4.866
D	3197	3177	20	7.6489	2.617
E	3177	3159	18	7.1619	2.513
F	3194	3181	13	4.3968	2.956
G	3178	3163	15	5.2491	2.857
H	3203	3185	18	5.5998	3.214

(資料來源：本研究試驗結果整理)

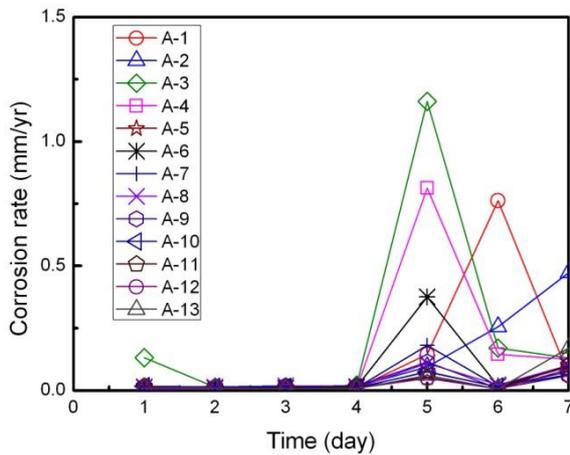


圖 4-7 I 柱 A 鋼筋的腐蝕速率變化

(資料來源：本研究試驗結果)

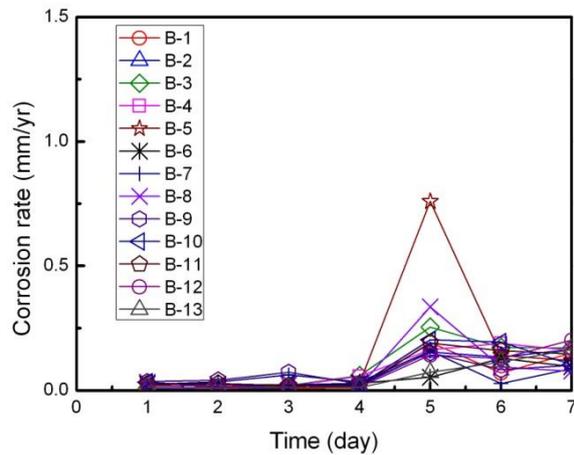


圖 4-8 I 柱 B 鋼筋的腐蝕速率變化

(資料來源：本研究試驗結果)

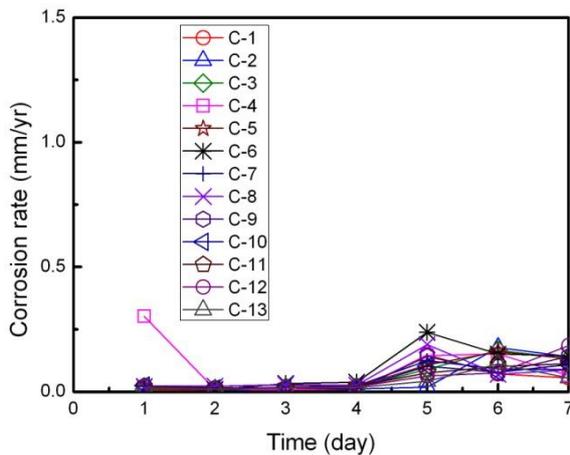


圖 4-9 I 柱 C 鋼筋的腐蝕速率變化

(資料來源：本研究試驗結果)

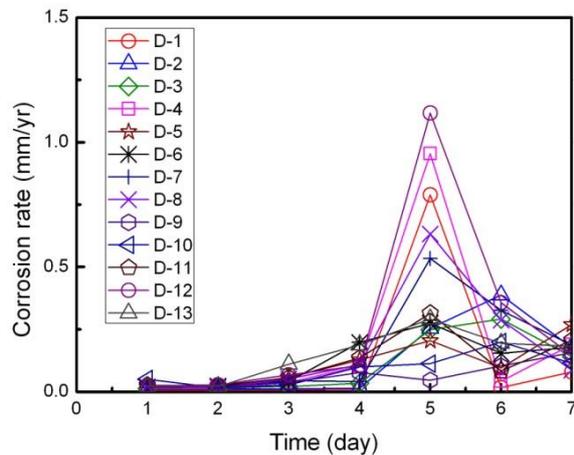


圖 4-10 I 柱 D 鋼筋的腐蝕速率變化

(資料來源：本研究試驗結果)

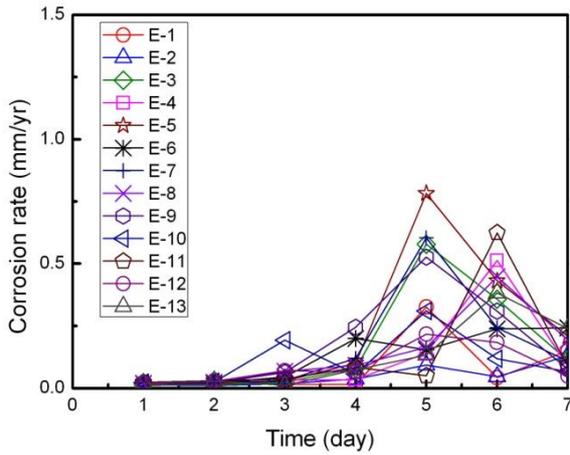


圖 4-11 I 柱 E 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果)

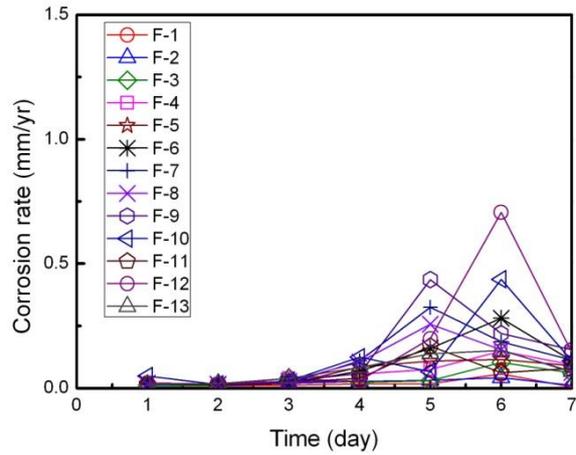


圖 4-12 I 柱 F 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果)

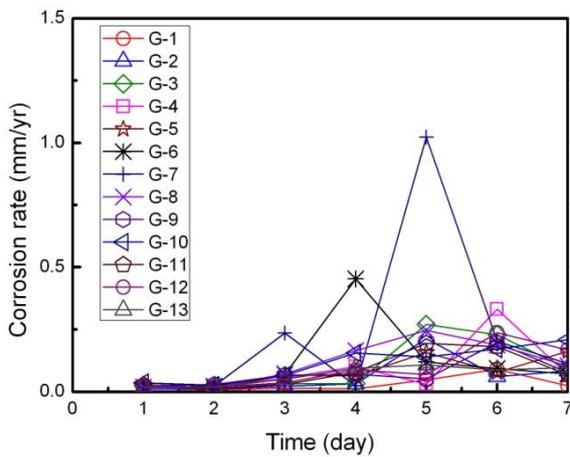


圖 4-13 I 柱 G 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果)

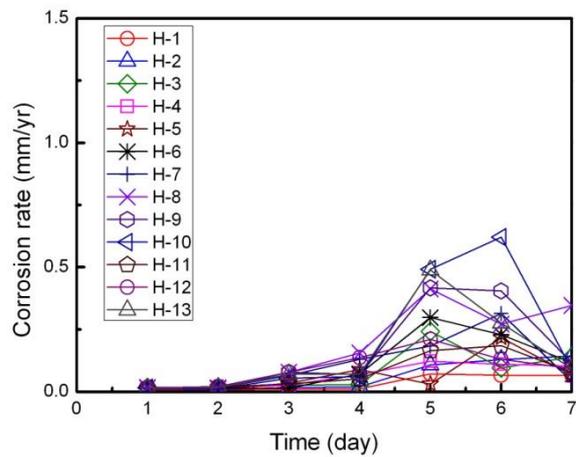


圖 4-14 I 柱 H 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果)

## 貳、足尺寸 II 柱腐蝕情形

II 柱的箍筋間距為 15 cm，結果如表 4-12 至表 4-20 及圖 4-15 至圖 4-22 所示。可以發現整體腐蝕的速率一樣在第四天有明顯上升，也會有突然上升之現象。該數據跳躍的現象較 I 柱少，可能是因箍筋間距較大的關係，故推測相同尺寸柱內的箍筋數量可能決定構件內部的腐蝕行為。另外發現此次試驗的量測計算值與重量損失兩者間的係數約在 7 以內，也是精準度相當的高的結果。雖略高於小尺寸混凝土的試體，可能原因在於箍筋間距較大，故試驗結果越趨近於砂漿試體。

表 4-12 足尺寸 II 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
A-1	0.578	0.786	0.751	16.408	3.845	28.890	46.884
A-2	0.965	1.039	1.876	10.047	7.302	9.855	16.349
A-3	0.590	1.251	1.534	14.007	10.968	7.256	27.449
A-4	0.753	0.491	0.742	8.194	5.791	7.502	40.285
A-5	0.895	0.573	1.075	8.473	5.426	0.738	12.962
A-6	0.621	0.729	0.929	5.544	6.614	0.714	11.022
A-7	1.086	0.821	1.105	3.983	4.737	1.051	13.458
A-8	0.692	0.711	0.943	5.167	4.619	8.811	1.484
A-9	0.727	0.514	0.788	5.895	3.662	9.651	0.911

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-13 足尺寸 II 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
B-1	0.658	0.772	0.760	14.840	1.191	11.248	11.447
B-2	1.071	1.182	0.668	13.814	25.882	20.954	13.196
B-3	0.938	1.334	1.354	10.585	8.050	11.280	6.370
B-4	0.762	0.573	0.774	8.156	4.385	5.013	9.379
B-5	0.734	0.747	0.747	13.095	3.265	6.814	13.463
B-6	0.885	0.765	0.968	9.239	7.029	0.771	29.718
B-7	1.070	1.010	1.290	3.886	10.860	0.803	25.163
B-8	1.189	1.146	1.149	7.434	12.667	1.059	0.695
B-9	0.908	0.835	1.019	10.555	4.795	1.111	0.999

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-14 足尺寸 II 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
C-1	0.812	0.713	0.673	5.041	18.999	12.815	16.325
C-2	0.736	0.851	1.119	17.605	18.418	5.919	66.738
C-3	0.792	0.656	0.805	15.062	5.256	6.838	7.628
C-4	0.744	0.465	0.733	24.429	5.480	5.188	6.790
C-5	0.860	0.627	0.691	25.994	2.798	3.326	4.728
C-6	0.820	0.514	0.798	2.245	4.370	4.959	5.798
C-7	1.052	0.550	0.957	2.701	6.088	4.933	6.677
C-8	0.793	0.852	0.892	12.274	6.614	3.396	8.534
C-9	0.566	0.901	2.454	4.893	3.732	5.297	7.376

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-15 足尺寸 II 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
D-1	0.647	0.930	1.599	23.480	1.502	1.414	1.318
D-2	1.668	2.472	2.558	16.578	2.128	22.399	2.269
D-3	1.892	5.007	4.699	11.876	12.642	16.965	4.811
D-4	2.297	2.448	10.928	41.605	25.610	19.842	16.862
D-5	2.032	1.908	8.878	3.965	31.895	25.212	40.580
D-6	2.540	1.973	6.574	9.547	22.214	16.894	29.045
D-7	2.872	2.839	8.382	17.977	47.650	12.348	21.813
D-8	2.470	2.675	7.906	35.647	10.243	26.729	6.432
D-9	2.430	2.398	7.357	23.345	11.793	9.066	8.858

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-16 足尺寸 II 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
E-1	0.975	2.943	1.580	15.660	18.395	76.800	27.763
E-2	1.070	1.287	1.526	46.852	36.187	26.249	19.283
E-3	2.025	1.533	2.644	110.240	8.728	13.885	42.243
E-4	2.967	2.154	3.267	4.887	45.129	45.103	45.333
E-5	1.938	1.850	4.760	7.723	38.468	20.773	18.939
E-6	3.509	3.256	9.860	10.810	54.645	58.035	7.953
E-7	4.936	4.553	10.130	12.021	37.931	50.814	16.890
E-8	4.687	6.446	5.937	25.311	16.158	49.322	20.951
E-9	3.893	4.764	11.081	44.065	38.298	120.100	28.385

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-17 足尺寸 II 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
F-1	0.755	0.629	0.860	4.949	5.602	16.755	20.707
F-2	2.300	1.324	1.533	5.359	5.719	14.770	21.332
F-3	1.721	1.466	7.066	13.772	10.601	36.685	25.362
F-4	1.556	1.984	4.256	18.471	17.385	45.654	24.443
F-5	1.667	3.163	11.081	55.805	8.402	17.367	36.017
F-6	1.664	2.227	9.188	39.891	15.554	17.260	19.851
F-7	2.088	2.226	6.400	12.983	32.894	25.993	33.084
F-8	6.092	2.766	5.636	11.241	19.152	21.993	48.760
F-9	3.998	3.616	5.374	16.052	10.615	27.429	16.243

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-18 足尺寸 II 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
G-1	0.953	0.907	0.915	15.544	16.167	6.685	6.580
G-2	1.555	1.726	2.205	17.979	3.172	18.339	39.922
G-3	1.904	3.240	8.079	69.604	15.828	24.652	31.616
G-4	4.193	4.306	4.742	28.290	26.209	13.557	12.898
G-5	4.886	4.530	11.942	37.280	27.927	14.236	25.304
G-6	2.016	5.131	11.769	6.863	19.803	21.209	58.65
G-7	2.714	3.742	19.847	1.873	5.749	35.202	11.758
G-8	1.339	3.753	13.674	15.541	21.791	7.853	13.948
G-9	1.229	4.817	11.639	14.901	31.436	12.758	13.912

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-19 足尺寸 II 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
H-1	0.952	0.949	0.775	6.084	27.335	58.098	9.462
H-2	1.225	1.568	1.295	10.089	21.525	30.563	21.585
H-3	1.219	2.610	4.145	25.493	8.375	8.870	72.596
H-4	2.688	3.312	9.047	15.229	30.829	14.597	85.641
H-5	1.885	3.895	9.097	13.882	11.784	9.713	13.142
H-6	1.810	2.708	6.719	60.227	13.126	38.491	39.041
H-7	2.514	2.306	7.170	18.560	13.078	10.847	7.256
H-8	2.610	3.600	4.716	16.933	10.416	14.767	19.568
H-9	1.835	7.306	13.537	14.640	20.964	9.462	45.753

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-20 足尺寸 II 柱計算腐蝕量與重量損失之關係

II 柱	原始重(g)	除鏽後重(g)	實際腐蝕量(g)	計算腐蝕量(g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
A	3231	3212	19	3.3698	5.638
B	3199	3180	19	3.0229	6.285
C	3184	3167	17	3.2187	5.281
D	3180	3166	14	5.8791	2.381
E	3242	3225	17	10.4217	1.631
F	3209	3188	21	6.9565	3.018
G	3198	3169	29	6.9934	4.146
H	3199	3184	15	7.5238	1.993

(資料來源：本研究試驗結果整理)

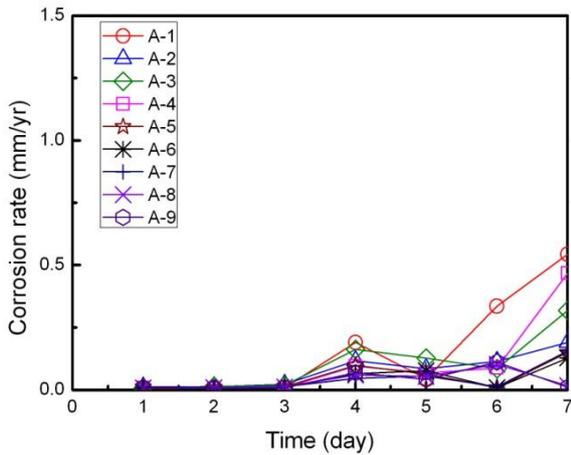


圖 4-15 II 柱 A 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

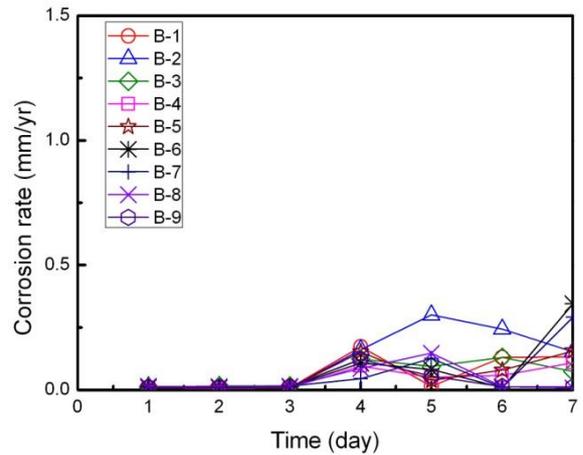


圖 4-16 II 柱 B 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

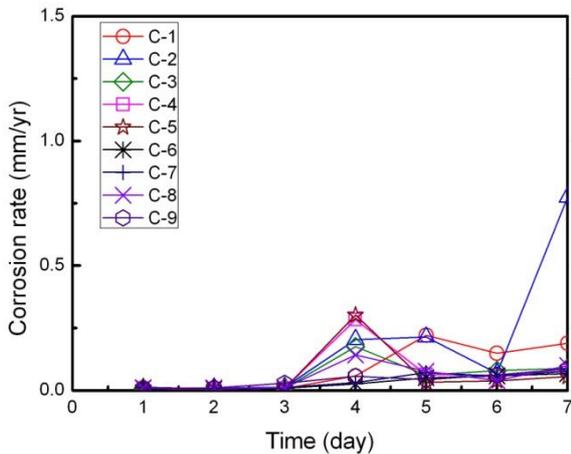


圖 4-17 II 柱 C 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

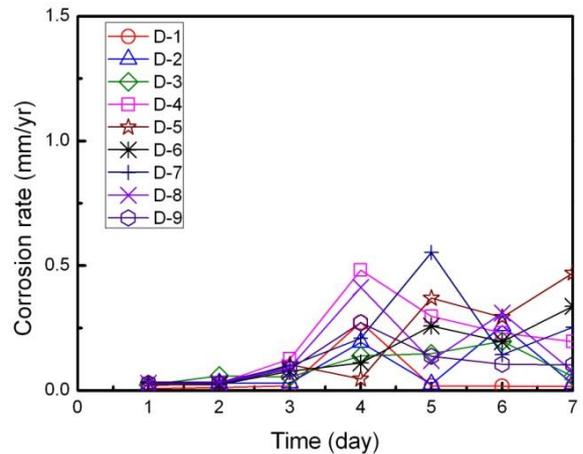


圖 4-18 II 柱 D 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

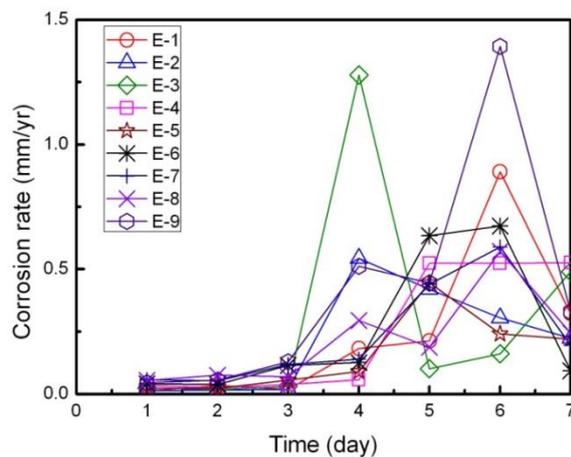


圖 4-19 II 柱 E 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

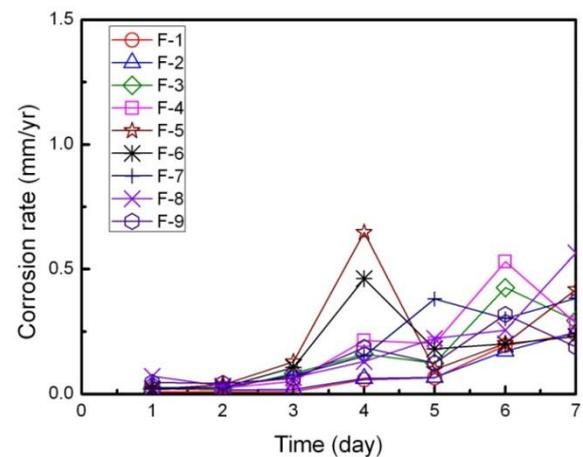


圖 4-20 II 柱 F 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

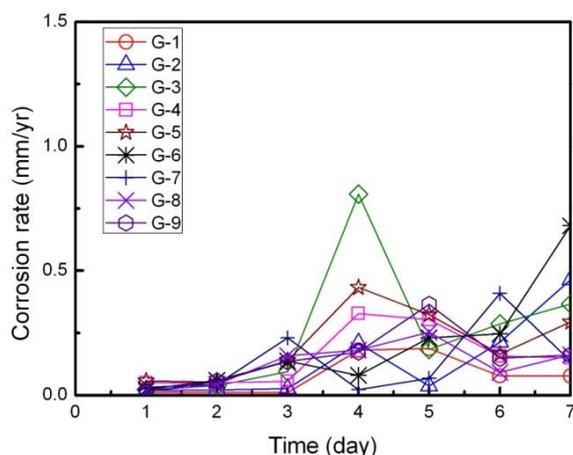


圖 4-21 II 柱 G 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

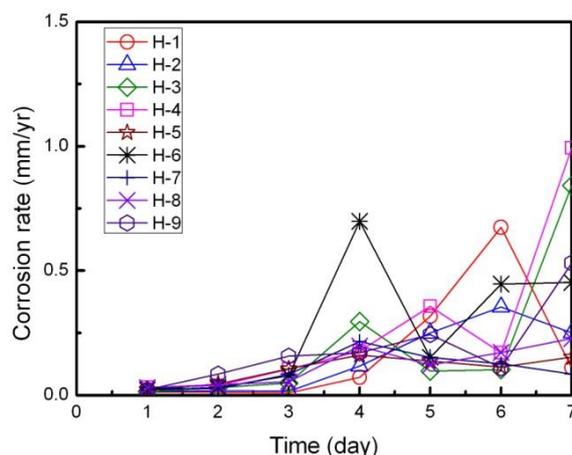


圖 4-22 II 柱 H 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

### 參、足尺寸 III 柱腐蝕情形

III 柱並無配置箍筋，其結果如表 4-21 至表 4-29 及圖 4-23 至圖 4-30 所示。可以發現，整體腐蝕幅度比前述兩柱大，但趨勢與前試體類似，在第四天左右試體滲出鏽水。此試體並無箍筋，所有的腐蝕電流皆由主筋承擔，故滲出鏽水的時間提前，除了 A 與 B 主筋外都能明顯看出此結果。另外，此次試驗的量測計算值與重量損失兩者間的係數約在 9 以內，雖然精準度較前述兩試體略低，但也說明該量測法在現地使用仍是可靠的。

表 4-21 足尺寸 III 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
A-1	0.626	0.701	0.820	0.686	33.094	16.885	17.962
A-2	0.686	0.796	0.997	0.809	24.264	35.141	25.329
A-3	0.849	1.736	1.146	0.995	10.565	18.107	17.335
A-4	0.909	1.026	1.151	0.953	6.712	60.500	17.037
A-5	0.895	0.702	0.712	0.562	9.102	7.975	12.718
A-6	0.927	0.705	0.708	0.754	6.276	16.321	20.005
A-7	0.756	0.522	1.158	0.428	5.034	19.192	10.295
A-8	0.616	0.443	0.453	0.604	3.859	20.694	16.081
A-9	0.664	0.342	0.246	0.524	4.302	9.596	10.129
A-10	0.838	0.442	0.402	0.848	0.978	7.230	10.586
A-11	1.662	1.096	1.623	2.159	1.795	8.060	14.209
A-12	2.382	3.597	3.242	3.638	3.356	13.327	19.078
A-13	1.619	1.943	2.599	4.028	1.789	38.316	15.058

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-22 足尺寸 III 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
B-1	0.927	0.993	0.963	0.938	1.684	15.222	34.930
B-2	1.002	1.183	1.012	1.210	1.249	16.164	23.640
B-3	0.928	0.970	1.279	0.918	5.334	6.737	10.108
B-4	0.824	0.836	0.785	14.487	8.560	8.216	11.115
B-5	0.703	0.517	0.449	30.638	5.686	8.203	10.842
B-6	0.710	0.464	0.413	33.367	7.506	11.589	9.1819
B-7	0.793	0.469	0.354	9.722	9.069	10.589	15.585
B-8	0.829	0.422	0.347	11.901	13.180	14.488	13.551
B-9	0.697	0.290	0.250	13.250	27.431	12.844	14.691
B-10	1.089	0.474	0.757	10.721	4.946	8.541	7.7096
B-11	2.452	1.592	2.003	10.580	10.504	13.828	21.933
B-12	2.849	2.649	4.157	15.289	32.123	25.426	30.183
B-13	2.714	1.027	1.481	0.147	1.471	35.908	8.182

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-23 足尺寸 III 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
C-1	0.585	0.531	0.547	0.564	4.879	3.336	17.669
C-2	0.613	0.532	0.546	14.296	6.674	23.595	31.076
C-3	0.732	0.638	0.736	16.611	7.793	12.645	44.212
C-4	0.597	0.455	0.497	13.665	4.878	8.060	14.891
C-5	0.541	0.458	0.574	16.521	6.080	8.898	10.203
C-6	0.582	0.449	0.421	17.395	1.516	10.480	9.605
C-7	1.111	0.261	0.435	5.649	12.327	9.272	11.815
C-8	0.267	0.252	0.256	8.687	6.567	10.243	10.161
C-9	0.580	0.369	0.422	3.438	4.178	7.831	8.828
C-10	1.137	0.685	0.692	3.347	3.676	7.041	11.722
C-11	1.090	3.009	1.381	6.893	2.721	15.020	12.818
C-12	2.517	2.466	2.045	0.233	28.845	20.589	16.345
C-13	1.602	0.929	0.985	11.767	75.753	28.535	28.882

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-24 足尺寸 III 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
D-1	0.719	0.845	0.941	15.129	2.835	25.090	40.919
D-2	0.693	1.144	1.093	15.174	12.087	17.446	40.150
D-3	0.816	0.943	1.031	7.781	29.796	8.677	34.774
D-4	0.835	1.164	1.430	14.224	54.564	11.565	35.358
D-5	0.942	1.182	1.496	29.974	20.354	13.708	51.138
D-6	0.835	1.240	1.313	25.587	26.48	28.304	24.360
D-7	1.095	1.423	1.704	28.664	23.843	18.756	38.678
D-8	1.041	1.327	1.785	6.543	23.656	29.675	47.162
D-9	1.098	1.536	2.116	34.229	21.109	29.597	75.252
D-10	1.275	1.821	2.480	9.230	19.342	31.344	27.956
D-11	1.607	2.121	3.290	8.790	15.391	14.338	28.504
D-12	1.336	2.582	3.518	4.389	18.077	14.878	39.622
D-13	1.664	3.071	3.978	10.615	18.821	28.770	30.443

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-25 足尺寸 III 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
E-1	0.728	0.846	0.720	19.256	16.747	21.081	37.729
E-2	0.526	0.769	0.822	14.312	106.870	37.294	36.148
E-3	0.661	0.823	0.926	1.104	0.848	25.722	12.704
E-4	0.654	0.963	1.067	0.325	7.632	39.993	33.468
E-5	0.788	1.122	1.697	35.513	4.546	31.622	31.629
E-6	0.747	1.086	1.584	22.792	0.958	112.140	30.175
E-7	0.768	1.341	1.432	9.706	10.639	15.262	21.008
E-8	0.857	1.097	1.833	31.944	31.686	33.443	27.928
E-9	0.841	1.103	2.062	5.290	59.431	25.678	29.320
E-10	0.907	1.632	1.817	5.527	25.871	17.802	7.349
E-11	1.241	1.586	1.821	1.626	15.466	4.662	28.878
E-12	0.667	1.739	2.400	1.701	12.355	3.486	27.330
E-13	1.021	1.788	2.156	38.288	28.133	5.607	16.505

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-26 足尺寸 III 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
F-1	0.588	1.078	0.599	0.495	0.579	12.413	76.968
F-2	0.550	1.192	0.717	0.585	0.664	17.955	0.565
F-3	0.709	1.287	0.989	0.817	1.656	22.753	27.105
F-4	0.898	1.317	1.360	1.002	2.843	38.108	33.877
F-5	0.926	1.456	1.913	2.123	4.715	20.375	18.159
F-6	0.871	1.546	2.021	1.916	3.832	19.549	23.489
F-7	1.036	1.846	1.792	1.067	4.425	12.966	21.437
F-8	1.118	1.597	2.938	2.541	6.235	56.191	72.184
F-9	1.297	1.543	2.585	3.647	2.445	43.908	36.568
F-10	1.455	1.178	3.875	50.112	3.298	64.146	34.106
F-11	1.321	1.163	4.360	15.607	1.072	26.781	51.876
F-12	2.018	2.184	3.980	18.899	5.850	53.094	29.109
F-13	1.463	2.462	3.637	28.600	3.096	21.984	26.796

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-27 足尺寸 III 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
G-1	0.791	2.093	0.951	0.821	0.702	22.305	28.972
G-2	0.687	1.845	0.900	18.329	1.560	51.110	32.498
G-3	0.873	1.601	0.948	41.971	2.368	18.758	39.496
G-4	0.955	1.885	1.370	26.309	5.274	21.033	27.324
G-5	1.171	1.561	1.746	28.506	40.297	19.221	41.929
G-6	0.948	1.942	2.001	29.394	13.443	28.417	34.100
G-7	2.308	1.625	2.836	22.460	33.888	35.650	32.802
G-8	1.259	2.282	2.986	9.800	9.952	84.855	64.528
G-9	1.500	2.018	3.513	7.474	11.631	17.599	33.031
G-10	1.267	2.215	7.836	7.660	16.873	17.711	59.817
G-11	1.699	2.620	7.547	28.788	21.734	48.525	84.956
G-12	2.065	2.776	3.916	17.759	11.099	29.430	3.741
G-13	2.788	3.354	7.391	15.373	7.186	44.588	44.223

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-28 足尺寸 III 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
H-1	0.470	1.586	0.585	5.753	9.563	26.035	46.509
H-2	0.533	1.190	0.678	36.038	17.564	24.263	26.101
H-3	0.719	1.112	0.868	41.711	53.819	7.0523	58.428
H-4	0.819	0.945	1.256	37.187	37.555	13.929	50.352
H-5	0.909	0.956	1.532	53.804	47.404	25.933	29.542
H-6	0.922	1.171	1.378	15.649	62.937	20.350	22.331
H-7	1.025	1.521	2.227	30.334	63.019	50.579	23.82
H-8	0.999	1.465	2.240	33.096	22.871	56.291	62.714
H-9	0.963	1.387	2.715	47.289	2.799	35.991	42.286
H-10	1.015	1.387	4.687	35.199	16.350	29.461	57.556
H-11	1.174	1.596	13.467	35.233	12.798	34.695	35.128
H-12	1.216	2.346	6.790	40.399	11.060	21.023	50.824
H-13	0.944	2.401	4.562	35.161	13.541	18.446	32.900

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-29 足尺寸 III 柱計算腐蝕量與重量損失之關係

III 柱	原始重(g)	除鏽後重(g)	實際腐蝕量(g)	計算腐蝕量(g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
A	3196	3158	38	4.4707	8.499
B	3204	3177	27	5.1421	5.250
C	3190	3159	31	4.4652	6.942
D	3200	3166	34	9.3168	3.649
E	3268	3237	31	8.7833	3.529
F	3181	3147	34	7.6269	4.457
G	3250	3216	34	10.1482	3.350
H	3198	3161	37	12.5661	2.944

(資料來源：本研究試驗結果整理)

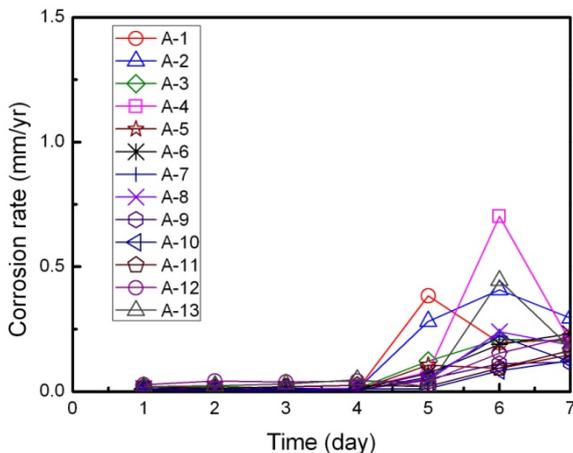


圖 4-23 III 柱 A 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果)

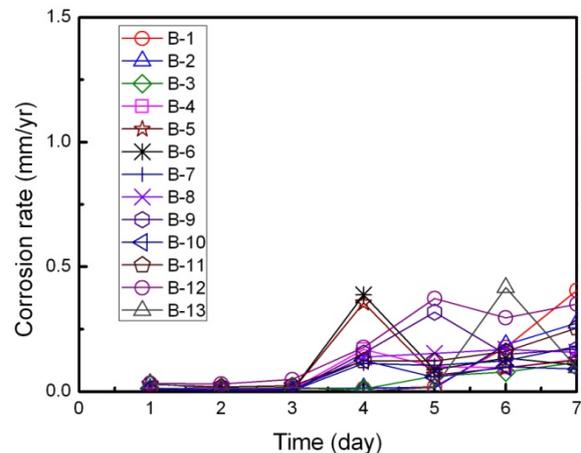


圖 4-24 III 柱 B 鋼筋的腐蝕速率變化  
(資料來源：本研究試驗結果整理)

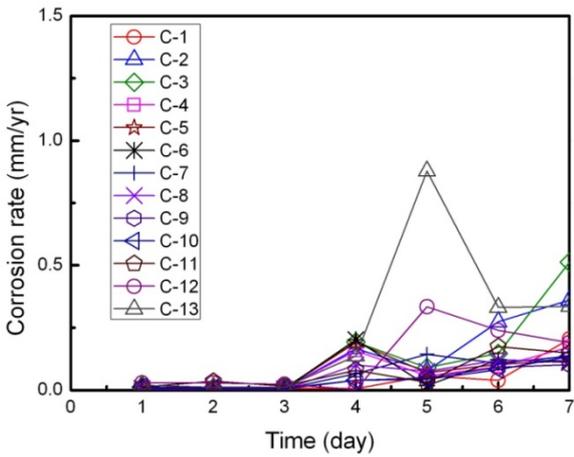


圖 4-25 III 柱 C 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果整理)

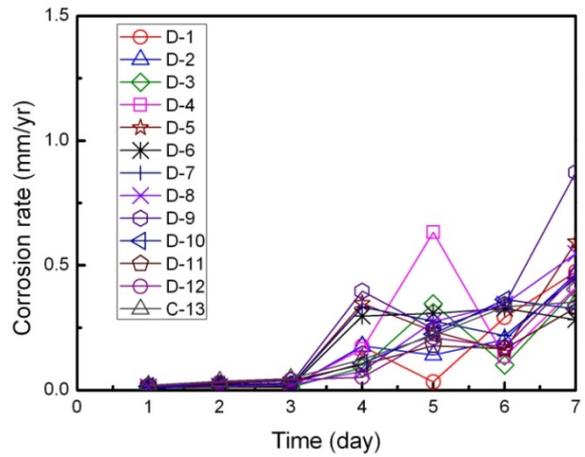


圖 4-26 III 柱 D 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果整理)

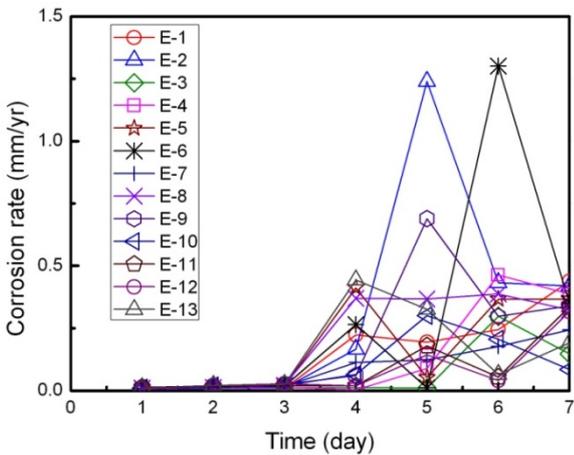


圖 4-27 III 柱 E 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果整理)

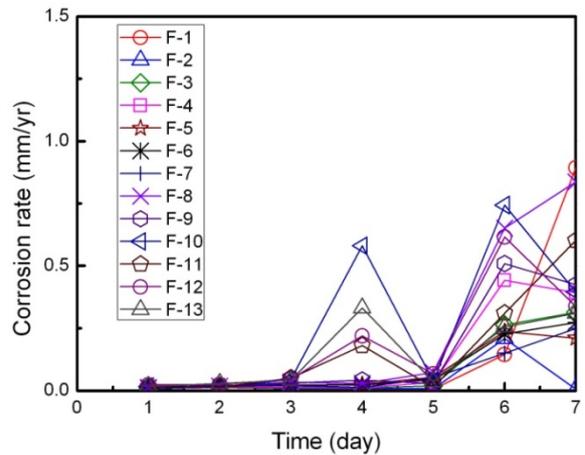


圖 4-28 III 柱 F 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果整理)

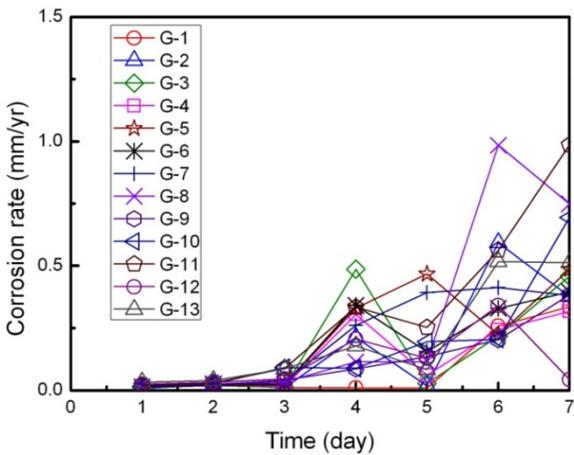


圖 4-29 III 柱 G 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果整理)

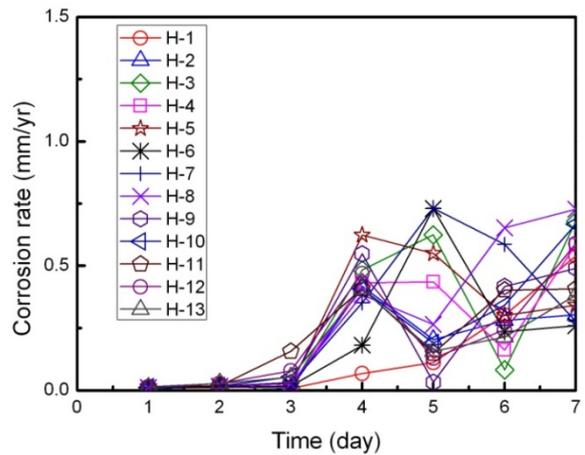


圖 4-30 III 柱 H 鋼筋的腐蝕速率變化 (資料來源：本研究試驗結果整理)

## 肆、足尺寸箍筋腐蝕情形

試驗結果發現大部分箍筋的重量損失在 20-60 克間，如表 4-30 所示。2 號及 12 號箍筋有嚴重的鏽蝕現象，但仍屬少數之情形。由於每根箍筋皆與該柱八根主筋相連，其腐蝕行為複雜故難以推測可能原因。然而，本研究的重點在於主筋的腐蝕量測，箍筋的存在於本次量測中似乎影響不大，仍可以適當的係數推算重量損失。

表 4-30 足尺寸箍筋的重量損失

箍筋編號	所在柱編號	箍筋原始重(g)	箍筋除鏽重(g)	真實重量損失(g)
1	I	1618	1610	8
2		1586	1377	209
3		1595	1549	46
4		1595	1546	49
5		1604	1543	61
6		1587	1576	11
7		1549	1528	21
8	II	1616	1575	41
9		1625	1573	52
10		1584	1561	23
11		1597	1545	52
12		1608	1364	244

(資料來源：本研究試驗結果整理)

#### 第四節 足尺寸貼磚試體試驗

##### 壹、貼磚腐蝕鋼筋柱構件試體

本研究參考專家座談會的討論，選定貼覆磁磚的種類為馬賽克磚及二丁掛磚，並參考專家意見新增吸水率 6-10% 之磁磚貼覆。由於 CNS 9741-R2165 及 CNS 9742-R2166 規定其外牆磁磚吸水率依材質區分為 1% 以下、6% 以下及 18% 以下，故本研究擬新增磁磚吸水率與腐蝕量測之影響。同時考量一般建築物外牆磁磚貼覆選用吸水率較低的磁磚，其柱試體依照原設計灌製筋間距為 15 cm、10 cm 及無箍筋之試體。主構件試體製作同本章第二節所述，混凝土水膠比為 0.416，實際配比如表 4-31 所示，磁磚貼覆的過程如圖 4-31 所示。過程中，試體直立放置水槽，添加 3.5% NaCl 溶液後，電源供應器皆單獨接到一支縱向鋼筋上再通電腐蝕，電流施加大小則為 0.55 A 並持續通電約 7 天。

表 4-31 混凝土配比設計表

工程名稱	腐蝕柱試體					
工程設計強度	280 kg/cm <sup>2</sup>	4000psi	配合設計需要強度	322 kg/cm <sup>2</sup>	坍度	15 cm
水膠比	0.416	砂細度模數		2.80	砂(S.S.D)比重	2.60
石(S.S.D.)比重	2.61	水泥廠牌		台泥 I 型	空氣含量	2.0%
砂佔全粒料百分率	44.67 %	每公方淨水用量		172 kg	砂水用量計算常數	
每公方膠節材用量	414 kg	每公方水與膠結材應佔體積		306 L	最大粒徑尺寸	X Y
每公方粒料體積	674 L	每公方砂應佔體積		301 L	13mm	52.0 199.0
每公方粗粒料體積	373 L	每公方砂用量		782 kg	19mm	48.9 185.0
每公方石用量	973 kg	配合比例 (水泥:砂:石)		1:1.89:2.35	25mm	47.5 177.0
備註：添加 Type F 高性能減水劑，藥劑用量為全灰量*0.6%，減水率為 15% = 減水 14 kg，爐灰用量為全灰量*15% = 62kg + 水泥用量 352 kg = 全灰量 414 kg。					38mm	45.0 165.0
					50mm	42.0 158.0
					75mm	40.0 144.0

(資料來源：本研究試驗結果整理)



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4 - 31 貼磚試體製作：(a)量尺寸現場放樣；(b)磚表面清潔；(c)貼覆磁磚情形；(d)磁磚貼覆完成示意

(資料來源：本研究拍攝)

## 貳、貼磚足尺寸 I 柱腐蝕結果

如前節所述(I 柱為箍筋間距 10 cm 之柱), I 柱貼覆吸水率 6% 以下的二丁掛磚, 貼磚足尺寸試體與小尺寸試驗採用相同的腐蝕電流密度  $1 \text{ mA/cm}^2$ , 即以 0.55 安培之總電流通電。之後於預定齡期在每個點位進行三次的量測, 若 GalvaPulse 腐蝕量測儀無法正確讀出便記錄為 0, 接著進行連續 7 天的監測。結果可以發現, 整體腐蝕電流密度的量測極不穩定, 顯示為 0 的資料相當的多, 如表 4-32 至表 4-40 所示。結果顯示從第五天開始逐漸獲得量測數據, 推測此時腐蝕相當嚴重, 且部份鏽水已溢出試體表面, 故儀器可以量測到。以上試驗結果說明, 若表面貼覆二丁掛磁磚則無法進行有效量測。各鋼筋量測到的值差異相當大, 雖然並非是每根都如此, 但這也增加了分析上的困難。另外, 本次試驗的量測計算值與重量損失兩者間的係數不到 7(除 A 鋼筋外), 略比前述無貼覆試體高, 如表 4-40 及圖 4-32 所示。

表 4-32 貼磚足尺寸 I 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A/cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
A-1	0	0	0	0	0	0	0
A-2	0	0	0	0	0	0.732	0.329
A-3	0	0	2.019	0	0	0.685	1.365
A-4	0	8.863	0	0	0	0.102	1.365
A-5	0	5.918	0	0	0	0.958	0.610
A-6	0	0	0	0	0	0	0.610
A-7	0	7.098	0	0	0	0.066	1.811
A-8	0	0	0	0	0	0	2.148
A-9	1.638	15.850	0	0	0	0	0.704
A-10	0	0	0	0	0	0	1.936
A-11	1.035	9.754	1.711	0	0	0	2.872
A-12	0	0	0	0	0	0	0.445
A-13	0	1.086	10.922	0	0	1.307	3.342

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-33 貼磚足尺寸 I 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
B-1	0	0	0	0	0	0	0
B-2	0	0	0	0	0	0	3.743
B-3	0	0	0	0	0	0	10.253
B-4	0	4.821	0	0	0	2.280	0.549
B-5	0	7.3274	0	0	0	0	4.843
B-6	0	23.147	0	0	8.639	0	2.713
B-7	7.968	0	0	0	13.351	0.866	0.816
B-8	0	0	0	0	0	0.714	3.605
B-9	6.841	0	3.251	0	6.610	3.593	2.038
B-10	0	3.755	0	0	0	1.883	0.635
B-11	24.086	0	0	0	3.762	0.203	4.294
B-12	0	12.215	5.605	0	0	0.237	1.179
B-13	16.195	23.899	0	0	14.414	0.220	2.806

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-34 貼磚足尺寸 I 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
C-1	0	0	0	0	0	0	0
C-2	0	0	0	0	0	0	0.568
C-3	0	0	0	28.579	8.648	2.152	2.371
C-4	0	0	0	28.120	0	0.420	3.599
C-5	0	7.692	0	0	10.486	0.422	3.599
C-6	7.717	1.909	19.228	0	5.818	0.279	1.078
C-7	0	3.601	0	0	6.969	0.361	1.048
C-8	11.757	2.420	0	0	0	0.215	0.451
C-9	9.025	5.034	6.819	0	1.339	0.106	0.590
C-10	36.180	4.558	0	0	6.635	0.286	0.377
C-11	2.748	2.419	0	0	8.393	0.202	0.529
C-12	20.951	11.497	16.312	0	5.476	0.358	2.633
C-13	13.247	2.250	0	0	3.318	0.243	0.283

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-35 貼磚足尺寸 I 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
D-1	1.782	0	0	0	0	0	0
D-2	0	0	0	0	0	2.385	7.315
D-3	7.110	0	0	0	0	5.511	1.420
D-4	19.696	0	0	0	40.568	5.670	3.280
D-5	42.892	0	0	0	0	5.739	4.717
D-6	0	0	21.401	0	0	5.446	5.275
D-7	68.308	0	10.802	0	0	2.359	13.953
D-8	14.715	0	0	0	0	4.593	1.389
D-9	0	0	6.917	5.797	15.765	6.967	2.508
D-10	0	0	21.059	16.195	72.352	9.156	8.188
D-11	0	0	14.637	0	9.797	3.762	3.254
D-12	0	0	10.621	2.072	0	14.054	7.953
D-13	0	0	25.850	0	3.613	17.090	5.749

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-36 貼磚足尺寸 I 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
E-1	2.077	0	0	0	0.234	0.154	0
E-2	8.515	0	4.630	0	3.411	1.398	0.627
E-3	70.210	0	0	0	78.050	2.536	0.954
E-4	34.912	0	15.118	0	23.156	0.983	2.504
E-5	57.944	15.104	0	0	14.216	1.801	2.472
E-6	0	10.252	0	0	14.376	2.146	2.411
E-7	4.703	3.970	0	0	14.532	1.0795	1.826
E-8	0	6.152	0	0	7.901	1.451	1.589
E-9	8.434	2.695	0	7.504	0.947	1.629	0.503
E-10	39.798	6.670	0	0	5.342	1.782	1.647
E-11	22.040	11.239	0	0	7.559	0.939	1.357
E-12	7.446	6.442	24.303	0	0	0.983	1.468
E-13	25.046	11.526	26.832	0	0	8.648	1.077

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-37 貼磚足尺寸 I 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
F-1	0	0	0	0	0	0.258	0.073
F-2	0	0	0	0	0	0.982	0.388
F-3	0	0	0	0	20.926	2.606	2.855
F-4	0	0	0	0	0	3.527	1.331
F-5	0	10.333	0	0	8.419	2.415	1.110
F-6	0	12.787	0	0	0	2.647	4.757
F-7	0	11.631	0	35.410	21.425	1.830	0.521
F-8	0	28.812	0	0	14.170	2.281	2.541
F-9	0	11.144	0	0	3.077	1.307	1.314
F-10	0	0	0	0	24.022	3.935	1.732
F-11	0	0	0	0	6.603	3.333	0.507
F-12	9.286	18.003	0	0	0	3.360	2.233
F-13	19.817	10.905	0	0	3.585	3.908	2.581

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-38 貼磚足尺寸 I 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
G-1	0	0	0	0	0.248	0.109	0.189
G-2	0	0	0	0	11.967	1.462	0.510
G-3	0	0	0	0	12.420	3.887	0.510
G-4	0	0	0	0	6.862	2.151	3.282
G-5	0	0	0	0	8.742	1.993	3.245
G-6	0	0	0	0	18.974	2.860	0.632
G-7	0	12.207	0	0	9.825	3.344	0.632
G-8	0	18.464	0	0	11.176	3.822	0.828
G-9	0	0	0	41.244	0	2.460	4.610
G-10	0	0	0	22.306	8.705	4.166	1.610
G-11	0	0	12.827	20.068	10.272	2.900	4.503
G-12	54.730	0	13.237	0	6.897	2.802	0.306
G-13	24.121	0	0	0	7.493	3.701	3.838

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-39 貼磚足尺寸 I 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
H-1	0	0	0	0	0	0	0
H-2	0	0	0	0	0	0.676	0.099
H-3	0	2.361	0	0	10.714	1.413	0.513
H-4	0	5.341	0	0	11.854	2.239	0.513
H-5	0	3.905	0	0	9.985	2.063	2.265
H-6	0	0	0	0	5.196	0.94	0.373
H-7	15.048	0	19.574	0	3.184	0.920	0.373
H-8	5.320	0	0	0	4.221	0.809	0.373
H-9	3.373	0	0	0.237	4.105	1.009	1.061
H-10	8.948	13.450	0	8.992	5.526	1.739	0.946
H-11	40.393	8.609	0	0	9.323	1.361	0.886
H-12	24.137	0	40.934	0	6.097	1.957	0.970
H-13	12.890	14.513	15.907	0	3.097	0.954	1.625

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-40 貼磚足尺寸 I 柱與重量損失之關係

貼磚 I 柱	原始重(g)	除鏽後重(g)	實際腐蝕量(g)	計算腐蝕量(g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
A	3164	3145	19	0.9457	20.090
B	3141	3129	12	2.4505	4.896
C	3168	3153	15	3.2035	4.682
D	3140	3119	21	5.7044	3.681
E	3139	3121	18	5.7807	3.113
F	3181	3163	18	3.5889	5.015
G	3181	3161	20	4.1465	4.823
H	3139	3117	22	3.2364	6.797

(資料來源：本研究試驗結果整理)

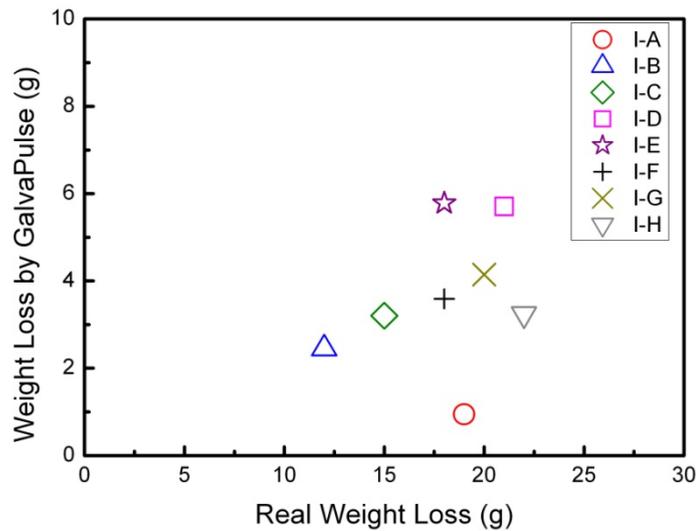


圖 4-32 貼磚足尺寸試體計算腐蝕量及重量損失之關係  
(資料來源：本研究試驗結果)

#### 貳、貼磚足尺寸 II 柱腐蝕結果

II 柱為箍筋間距 15 cm 之柱並貼覆吸水率 1% 以下的馬賽克磚，其它材料條件與 I 柱相同，也進行連續 7 天的監測。可以發現，整體腐蝕電流密度的量測一樣極不穩定，顯示為 0 的資料相當的多，如表 4-41 至表 4-48 所示。試驗結果可以看出也是從第五天開始逐漸獲得數據，但比起 I 柱較不明顯，推測是因灰縫影響鏽蝕路徑。試驗後期，鏽水已溢出試體表面，此時試體已視為破壞，仍無法進行有效量測。就個別鋼筋而言，其數值比 I 柱的結果更不穩定，推測是因電極所涵蓋的灰縫密度不同而影響極化結果。本次試驗的量測計算值與重量損失兩者間的係數不到 9，如表 4-49 及圖 4-33 所示，亦略高於未貼覆之足尺寸試體。此外，相較於之前的試驗結果，其更能量測到前三天的數據，推測亦是因灰縫的密度影響量測。

**表 4-41 貼磚足尺寸 II 柱 A 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
A-1	0	0	0	0	0	0	0
A-2	0	0	0	38.788	0	0	0
A-3	0	0	23.826	82.965	0	3.935	0
A-4	0	0	0	47.282	0	3.371	1.433
A-5	0	0	0	34.181	0	1.601	0.869
A-6	0	0	0	46.283	0	2.036	0.869
A-7	0	0	0	14.499	5.280	2.000	9.149
A-8	0	0	0	20.542	2.198	1.413	2.130
A-9	0	0	0	15.426	14.469	1.880	1.382

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-42 貼磚足尺寸 II 柱 B 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
B-1	0	0	0	0	0	0.251	0
B-2	0	0	0	74.188	24.082	1.497	0
B-3	0	0	0	25.046	36.066	3.058	0
B-4	0	6.454	0	0	5.186	2.115	0
B-5	0	0	0	0	4.609	1.483	0.260
B-6	0	0	0	0	2.285	1.163	2.537
B-7	0	0	0	0	8.938	3.117	1.542
B-8	0	0	0	0	9.726	2.766	2.847
B-9	0	8.319	0	45.497	9.217	9.455	2.847

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4-43 貼磚足尺寸 II 柱 C 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )**

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
C-1	0	0	0	0	0	0.827	0
C-2	0	0	0	57.836	11.914	12.130	1.858
C-3	0	0	0	0	22.322	8.171	3.933
C-4	0	0	0	0	18.478	4.040	1.243
C-5	0	0	0	0	11.459	3.750	2.946
C-6	0	0	0	0	11.447	7.503	2.267
C-7	0	0	0	0	39.268	5.770	0.379
C-8	0	0	0	0	12.578	7.484	1.679
C-9	0	0	0	0	34.533	14.678	4.058

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-44 貼磚足尺寸 II 柱 D 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
D-1	0	0	0	0	0	0	0
D-2	0	0	35.883	14.660	5.785	1.283	0.739
D-3	46.620	0	76.498	36.445	10.833	3.422	1.489
D-4	0	0	67.921	19.042	13.266	2.255	2.239
D-5	32.134	11.210	0	8.441	10.140	3.197	4.019
D-6	11.391	0	0	11.356	6.362	1.480	0.367
D-7	21.312	0	0	6.560	17.395	1.432	1.682
D-8	8.523	8.938	0	17.899	12.719	6.058	3.374
D-9	9.876	28.231	26.024	17.860	30.995	2.715	1.602

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-45 貼磚足尺寸 II 柱 E 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
E-1	0	0	0	0	0	0	0
E-2	58.658	0	0	0	4.418	3.905	0
E-3	0	0	0	0	7.147	18.292	0
E-4	52.194	0	34.773	18.439	5.919	3.298	0
E-5	27.915	0	20.052	0	4.375	8.566	0
E-6	0	93.414	7.836	13.521	4.524	6.962	0
E-7	0	8.242	0	31.879	4.177	5.174	0
E-8	0	0	17.298	35.786	6.627	2.880	0.587
E-9	0	10.031	32.179	15.196	4.833	6.294	1.094

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-46 貼磚足尺寸 II 柱 F 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
F-1	0	0	0	0	0	2.248	0
F-2	26.122	0	8.640	13.798	0	3.234	1.826
F-3	0	0	15.987	43.984	0	4.825	9.162
F-4	0	0	37.093	58.531	10.941	13.187	7.283
F-5	0	0	0	29.837	0	6.331	3.326
F-6	0	0	0	0	0	4.459	5.003
F-7	0	0	0	0	0	4.924	1.125
F-8	0	0	0	0	0	7.726	1.430
F-9	0	0	0	0	0	4.640	0.322

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-47 貼磚足尺寸 II 柱 G 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
G-1	0	0	4.070	0	0.829	0	0
G-2	0	0	15.092	0	12.766	4.890	2.088
G-3	0	0	11.379	0	21.760	9.750	15.043
G-4	0	0	6.103	0	11.907	16.156	3.834
G-5	0	0	15.560	0	4.321	5.467	22.203
G-6	0	0	18.974	0	8.938	12.630	9.871
G-7	0	0	19.680	0	6.708	3.082	2.554
G-8	0	0	60.192	0	6.459	5.373	11.769
G-9	0	0	10.112	0	0	5.650	1.678

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-48 貼磚足尺寸 II 柱 H 鋼筋之腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

量測點位	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
H-1	0	0	0	0	0	1.992	0
H-2	0	0	19.112	0	20.817	9.291	4.902
H-3	0	0	74.623	0	17.455	58.617	1.322
H-4	0	0	18.281	0	25.607	10.170	3.151
H-5	0	0	12.724	0	13.876	6.461	5.664
H-6	0	0	14.787	0	28.475	8.286	3.783
H-7	0	0	9.119	0	16.661	8.191	1.501
H-8	0	0	23.729	0	15.199	19.972	1.307
H-9	0	0	25.812	0	26.946	24.858	4.538

(資料來源：本研究試驗結果整理)

表 4-49 貼磚足尺寸 II 柱與重量損失之關係

貼磚 II 柱	原始重(g)	除鏽後重(g)	實際腐蝕量(g)	計算腐蝕量(g)	係數
	A	B	C=A-B	D	E=C/D
A	3187	3168	19	5.2781	3.599
B	3208	3183	25	3.0767	8.125
C	3135	3110	25	3.3046	7.565
D	3149	3128	21	6.6895	3.139
E	3169	3149	20	5.6566	3.535
F	3185	3169	16	3.7182	4.303
G	3182	3162	20	4.2898	4.662
H	3141	3119	22	6.5551	3.356

(資料來源：本研究試驗結果整理)

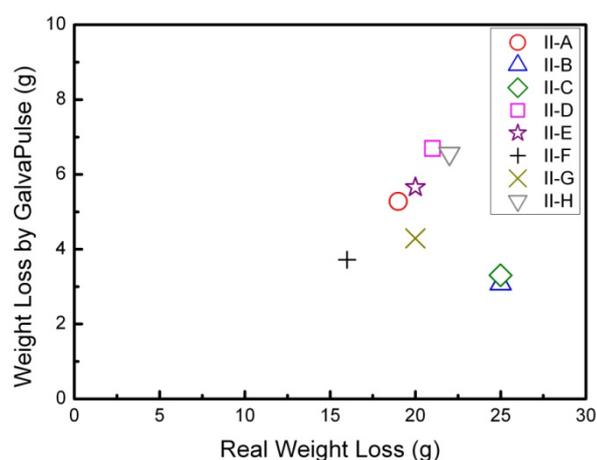


圖 4 - 33 貼磚足尺寸試體計算腐蝕量及重量損失之關係  
(資料來源：本研究試驗結果)

### 參、貼磚足尺寸試體箍筋腐蝕結果

本次試驗係以主筋通電而箍筋不通電，箍筋的重量損失如表 4 - 50 所示。箍筋綁紮是由上而下並依編號排序，I 柱箍筋為 1-7 號 II 柱則是 8-12 號，可以發現在最上層之箍筋因未浸泡在鹽水裡，所以損失為最少，而越下層之箍筋的鏽蝕量也越大，也或許底層水壓較大，氯離子濃度較高，造成氯離子更易進入。另外，由於不同的試體間所貼覆的磁磚種類及灰縫數量不同，故可發現兩貼磚柱在相同浸泡高度位置處的鏽蝕量不同，可能因通路的難易程度不同所造成。以目前結果而言，無法確定灰縫密度或是箍筋間距何者主要影響整體的鋼筋腐蝕行為。

表 4 - 50 貼磚足尺寸箍筋與真實重量損失之關係

箍筋編號	所在柱編號	箍筋原始重(g)	箍筋除鏽重(g)	真實重量損失(g)
1	I	1587	1581	6
2		1566	1547	19
3		1527	1511	16
4		1532	1502	30
5		1565	1533	32
6		1533	1503	30
7		1550	1501	49
8	II	1539	1531	8
9		1557	1524	33
10		1607	1561	46
11		1592	1544	48
12		1537	1485	52

(資料來源：本研究試驗結果整理)

#### 肆、貼磚足尺寸試體實際腐蝕結果

實際腐蝕情形如圖 4-34 至圖 4-37 所示，可以看出鏽水確實是從灰縫溢出，整體的行為較趨於均勻腐蝕，並無明顯集中在灰縫處，也表示即使在磁磚貼覆下，長時間的通電不會造成不均勻鏽蝕，而主筋及箍筋交界及彎鉤處因有應力殘留故都有較嚴重的鏽蝕。另外，不同的磁磚貼覆會影響鏽水溢出的路徑，也代表了灰縫少的磁磚貼覆可延緩因鋼筋腐蝕所發生的表面裂縫。



圖 4-34 通電七天後之貼磚足尺寸試體

(資料來源：本研究拍攝)



圖 4 - 35 貼磚足尺寸試體敲除混凝土後的腐蝕形態  
(資料來源：本研究拍攝)



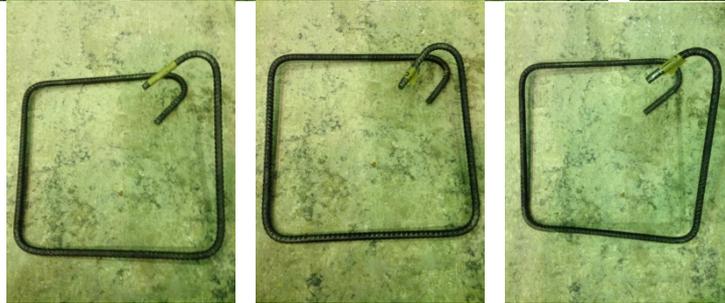
圖 4 - 36 均勻腐蝕  
(資料來源：本研究拍攝)



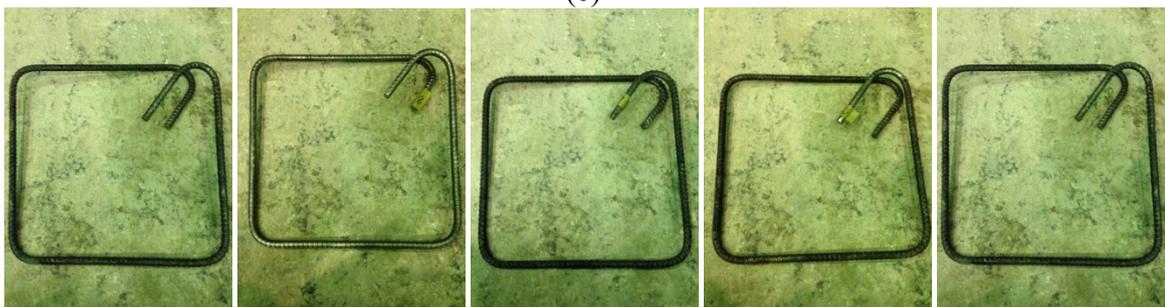
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4 - 37 將鏽蝕刷除後之鋼筋：(a) I 柱主筋；(b) II 柱主筋；(c) I 柱箍筋；(d) II 柱箍筋

(資料來源：本研究拍攝)

### 第五節 計算腐蝕量與重量損失比較

本研究使用小尺寸及足尺寸試體進行鋼筋腐蝕量測，其中小尺寸試體主要用以探討保護層性質及量測參數對量測值的影響，而足尺寸試體用以模擬現地量測時的步驟。小尺寸試體以砂漿為主(詳見第三章)，而足尺寸試體則皆為混凝土，其中部份試體之表面並貼覆磁磚(詳見第四章)，結果統整如表 4-51 至表 4-53 所示。

如同前述，就砂漿試體而言(表 4-51)，在保護層厚度 6 cm 以內且水灰比 0.5 以上時，計算腐蝕量約與重量損失成正比，可以用係數等於 15 保守估計。換言之，在滿足上述條件下，預估腐蝕量的最大誤差約 30%，若僅以趨勢線來估算的話，最大誤差約 15%。除此之外的條件下，由於量測值不穩定，故不宜由計算腐蝕量推求重量損失。另一方面，當試體為混凝土時(表 4-52)，其計算腐蝕量仍約與重量損失成正比，但其正比關係明顯與砂漿試體不同，計算腐蝕量較接近重量損失。由於一般混凝土少有高比例細粒料(如細粒料取代粗粒料比例達 1/2 時)，若僅考慮混凝土及細粒料取代粗粒料比例達 1/3 時，似乎係數取 5 大多可保守估計，最大誤差約 42%，若僅以趨勢線來估算的話，最大誤差約 30%。然而，實務上鋼筋混凝土構件多具有箍筋，試驗結果更進一步顯示，該正比係數受箍筋的間距影響甚大，如表 4-53 所示。若皆以係數等於 5 來估計，則最大誤差約 68%。為求保守估計，宜依鋼筋間距而改變此係數，例如無箍筋者使用 9、箍筋間距 10 cm 仍使用 5、箍筋間距 15 cm 則使用 7。

表 4-51 小尺寸砂漿試體中鋼筋的計算腐蝕量與重量損失比較

水灰比	保護層厚度 (cm)	係數 = 重量損失/計算腐蝕量	迴歸直線之 斜率	以係數 = 15 估計 之可能最大誤差
0.6	3	17.8 — 19.4	16.9	29.3%
	6	14.9 — 15.4	14.7	2.7%
	9	9.1 — 16.6	8.1	—
0.5	6	34.9 — 297.4	6.7 <sup>(1)</sup>	20.8%
0.4	3	23.4 — 93.9	15.2 <sup>(2)</sup>	2.9%
	6	19.0 — 65.4	—	—

(1) 迴歸直線的截距約 1 g

(2) 迴歸直線的截距約 2 g

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4 - 52 小尺寸混凝土試體中鋼筋的計算腐蝕量與重量損失比較  
(水灰比：0.6；保護層厚度 6 cm)**

細粒料取代粗粒料 比例	係數 = 重量損失/計算腐蝕量	迴歸直線之 斜率	以係數 = 5 估計 之可能最大誤差
0% (混凝土)	4.9 — 5.8	6.4	16%
1/3	2.9 — 3.5	3.5	42%
1/2	11.1 — 19.7	9.8	—
100% (砂漿)	14.9 — 15.4	14.7	—

(資料來源：本研究試驗結果整理)

**表 4 - 53 足尺寸貼覆磁磚混凝土試體中鋼筋的計算腐蝕量與重量損失比較**

箍筋間距	係數 = 重量損失/計算腐蝕量			
	未貼覆磁磚	以係數 = 5 估計 之可能最大誤差	二丁掛 吸水率 6%以下	馬賽克 吸水率 1%以下
無箍筋 (III 號柱)	2.9 — 8.5	42%	—	—
10 cm (I 號柱)	2.5 — 4.9	50%	3.1 — 6.8	—
15 cm (II 號柱)	1.6 — 6.3	68%	—	3.1 — 8.1

(資料來源：本研究試驗結果整理)

## 第五章 現地鋼筋腐蝕量測步驟

### 第一節 前言

目前應用於混凝土中鋼筋腐蝕量測的方法主要依照 ASTM C876 量測腐蝕電位，然而電位僅能提供腐蝕趨勢並無法判斷腐蝕速率，與實際鋼筋腐蝕情形相較，亦往往存在相當大的差異。因此，本研究的結果有助於瞭解既有腐蝕速率量測法於鋼筋混凝土的適用性及推估腐蝕量的方法。由於本研究發現直流極化法的誤差較大，因此多數試驗以脈衝電流量測法為主，以下所擬之現地鋼筋腐蝕量測步驟即基於此量測方法、本研究過程中的量測經驗與試驗結果。數年來，隨著技術的發展，開發使用該量測法的儀器商漸多，因此實務上容易採購到相關設備，未來此量測方法將可望納入量測規範。

### 第二節 以脈衝電流法測定鋼筋腐蝕速率

#### 壹、適用範圍

脈衝電流法適用於硬固砂漿及混凝土中鋼筋的腐蝕量測，以水灰比 0.5 以上且保護層 6 cm 以下的鋼筋腐蝕量測為原則。

#### 貳、儀器

脈衝腐蝕量測儀必須能適當極化鋼筋、量測腐蝕電流密度、可自定施加脈衝電流的大小與時間、可即時顯示脈衝電位曲線，以判讀該次量測是否有效。

#### 參、步驟

##### (1) 量測面之處理：

量測面必須無任何披覆及塗封。若有披覆及塗封必須以敲除方式移除，但裸露面必須平整，表面高低差不宜超過 0.5 cm (約為量測電極端海綿厚度的一半)。

##### (2) 量測點位：

標定主筋位置與箍筋位置，量測點位包括以主筋與箍筋交叉點為中心的點位及箍筋與箍筋間的點位(如圖 5-1)。

##### (3) 量測面之含水率：

保護層必須保持面乾內飽和的狀態。於氣乾狀態下，可利用灑水或浸置方式達

成。以浸置方式時，建議浸置時間 10 分鐘以上，或以水份計量測確認是否達飽和。

(4) 儀器架設：

待測鋼筋必須與脈衝腐蝕量測儀形成一迴路，因此必須敲除局部保護層以裸露鋼筋，裸露長度以可供儀器穩定連接導線為原則，此時亦可量測保護層厚度。

(5) 腐蝕電流密度的測定：

每點位以量測單次為原則。首先，於儀器設定相關試驗參數，主要包括量測長度(不大於電極直徑)及鋼筋直徑。觀察量測點位，若量測面已有明顯裂縫或鏽水滲出，則該點位不需量測。接著，將脈衝腐蝕量測儀的量測電極平穩按壓在量測面(如圖 5 - 2)。施加脈衝電流後，判讀即時量測畫面，若鋼筋經適當的極化則電位反應圖應如圖 5 - 3 所示，此時所量測的腐蝕電流密度值即為有效。若量測值無效，則建議間隔 3 分鐘以上再次量測，期間可調整施加的腐蝕電流值或時間。

## 肆、計算

鋼筋腐蝕速率(r)可以下式計算：

$$r = 0.129 \frac{a i_{\text{corr}}}{n \rho} \text{ (mpy)} = 0.00327 \frac{a i_{\text{corr}}}{n \rho} \text{ (mm/year)} \quad (5-1)$$

式中，

$i_{\text{corr}}$  = 腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$a$  = 鐵原子量 (g/mole)

$n$  = 3

$\rho$  = 鐵密度 ( $7.874 \text{ g}/\text{cm}^3$ )

## 伍、報告

報告宜包括下列項目。

- (1) 試驗日期及時間
- (2) 保護層厚度

- (3) 使用之脈衝電流大小及脈衝時間
- (4) 點位圖說，包括點位編號、鋼筋與箍筋位置(如圖 5 - 1 所示)
- (5) 以列表或圖形方式表示各點位所對應之鋼筋腐蝕速率

### 第三節 以腐蝕速率推算腐蝕量

鋼筋腐蝕量的推算可藉由腐蝕速率對時間的積分(圖 2 - 3)，再乘以鋼筋表面積可得。由於腐蝕速率隨時改變，故欲估算較可靠的腐蝕量，宜加強腐蝕量測的頻率，本研究中採每天 1 次量測。於現地使用時，宜考慮人力與物力，適當降低量測頻率，但量測頻率與計算腐蝕量誤差間的關係，有待後續長期研究。另外，總腐蝕量可藉由各量測處所計算之鋼筋腐蝕量加總而得。然而，當箍筋間距較密因而量測處重疊時，則重覆計算之鋼筋腐蝕量必須依重疊面積比例扣除。

本研究發現，在多數情況下，雖然計算腐蝕量小於重量損失，但兩者仍成線性正比，亦即兩者雖然值不同，但仍可由某一係數關係推算重量損失。然而本研究亦發現，此係數與保護層厚度、水灰比、粗細粒料比、含水率、鋼筋疊置等因子有關。實際進行量測時，保護層應保持在面乾內飽和狀態，降低含水率的影響因子。然而，就鋼筋疊置而言，實務上無法避免箍筋的存在，因此在主筋與箍筋交叉處的量測值有待商榷。根據本研究的結果，箍筋所在處的主筋腐蝕電流偏低，原因有待後續探討，但就足尺寸鋼筋混凝土試體而言，箍筋的存在並不明顯影響其係數。

就水灰比 0.5 以上、保護層 6 cm 以下的砂漿試體而言，本研究發現，僅以趨勢線來估算的話，不同保護層厚度下的係數約 15-17 之間，不同水灰比下的係數約 6-15 之間，故重量損失可以用係數等於 15 估算，誤差約在 15% 以內。另一方面，研究亦發現，粗細粒料比影響該係數甚大。對於混凝土，該係數可降至 3-5 之間，亦即更接近重量損失，因此可以取係數等於 5 來保守估算重量損失。足尺寸鋼筋混凝土的試體試驗亦發現，當鋼筋間距為 10 cm 時，也就是電極必須涵蓋鋼筋交疊處量測時，此時的係數約是 5，與小尺寸試體接近。然而，當鋼筋間距增加到 15 cm 時，也就是部份量測處不必涵蓋鋼筋交疊處時，此係數增加到 7。因此，若保守估算選用係數等於 7，就一般鋼筋混凝土構件而言，誤差約在 30% 以內。實務上，保護層的粗細粒料比不易估算，尤其當搗實不均時，很可能僅砂漿存在，故建議儘可能於敲除部份保護層時，觀察保護層內的組成，採用適當係數推估。

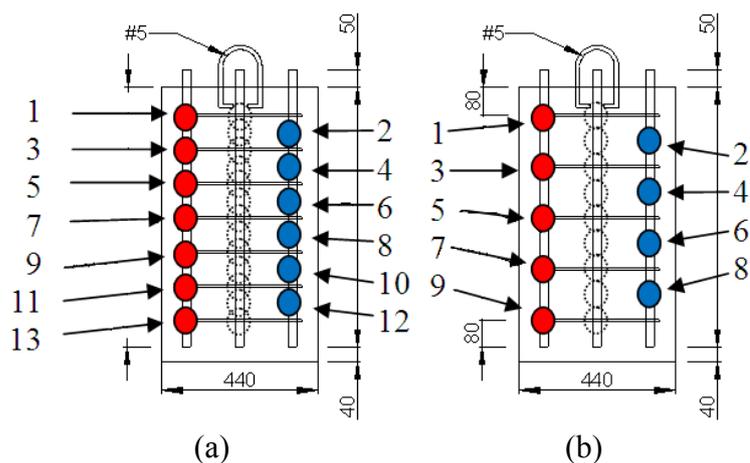


圖 5 - 1 腐蝕量測點位說明

(資料來源：本研究繪製)

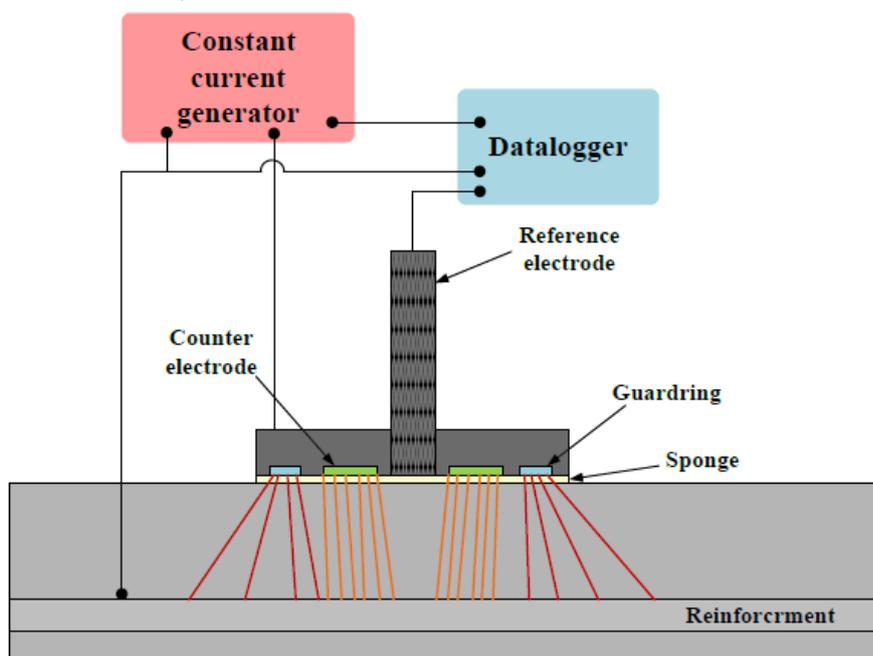


圖 5 - 2 脈衝腐蝕量測儀的架設

(資料來源：Klinghoffer, O., [16])

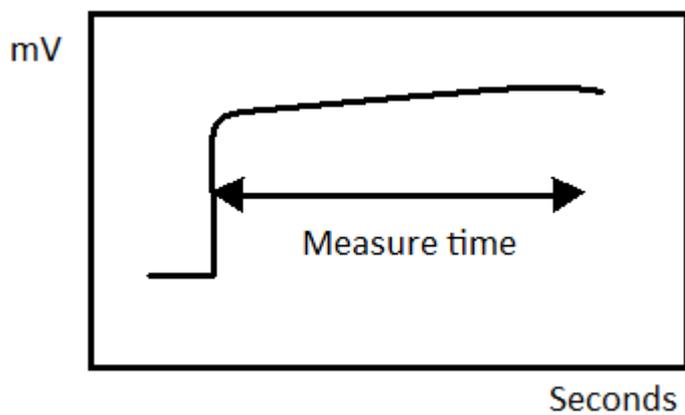


圖 5 - 3 脈衝電位與時間關係

(資料來源：Germann Instruments A/S, [17])

## 第六章 結論與建議

### 第一節 結論

本研究探討以電化學量測鋼筋混凝土中鋼筋腐蝕的技術及其影響因子，所探討的材料影響因子包括水灰比、保護層厚度、粗細粒料體積比、含水量、鋼筋配置、氯離子含量、表面披覆等，量測因子則包括脈衝電流大小、脈衝電流時間、過電位大小、過電位施加時間等，統整試驗結果，所獲致的結論整理如下：

- 一、當水灰比 0.5 以上且保護層 6 cm 以內時，鋼筋之腐蝕量可由腐蝕速率對時間積分再乘以一係數估算，所得之計算結果與實際重量損失量兩者間約成正比，而其正比關係主要受到水灰比、保護層厚度、粗細粒料體積比與鋼筋疊置所影響。
- 二、不論使用直流極化法或脈衝腐蝕量測法，所估算的結果皆低於實際重量損失。以脈衝腐蝕量測法量測砂漿中的鋼筋腐蝕時，實際重量損失量可以用計算結果乘上 15-18 保守估算。若以 15 估算，誤差大約 15%。然而，以直流極化法量測該鋼筋腐蝕時，該乘上係數可由 16(水灰比 0.6 且保護層厚度 3 cm)變化到 69(水灰比 0.6 且保護層厚度 6 cm)，故現地量測以脈衝量測法為宜。
- 三、量測值受含水率影響甚大，當含水率越低時，量測值越小且不穩定。含水率由面乾飽和態降低 5% 時，量測值約降低 20%，故現地量測以保持量測面面乾飽和為原則。
- 四、使用脈衝量測法時，量測值隨著脈衝時間的增加而下降，隨著脈衝電流的增加而增加。對於多數鋼筋腐蝕量測而言，使用脈衝電流 100  $\mu\text{A}$  與脈衝時間 10 s 可適當極化鋼筋。
- 五、使用直流極化法時，過電位從  $\pm 5$  mV 變化到  $\pm 15$  mV，量測間隔時間 30 s-60 s 間並不明顯改變量測值，因此使用過電位  $\pm 10$  mV、間隔時間 30 s 可獲得穩定量測值。
- 六、當鋼筋疊置時，量測值低且不穩定，約在 4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以內，實際重量損失量反較計算結果小，約為計算結果之  $1/134 - 1/78$ ，故現地量測時宜避免量測箍筋與主筋疊置處。

以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究

- 七、計算結果與實際重量損失量間的係數關係亦受保護層粒料體積比的影響。當保護層為混凝土時，此係數約 5-6，遠低於砂漿時的係數 15-18，亦即其計算結果較砂漿保護層更接近真實重量損失。
- 八、就足尺寸試體而言，運用脈衝腐蝕量測法可有效量測鋼筋混凝土內隨時間變化的鋼筋腐蝕速率。當無箍筋存在時，其正比係數約介於 3-8 間。當箍筋間距 10 cm 時，其係數約介於 2-5 間。當箍筋間距 15 cm 時，其係數約介於 2-7 間。於現地量測時，由於多數情況下鋼筋間距小於 15 cm，因此可保守以 5 估計，此係數值亦相近於小尺寸混凝土試體的結果。
- 九、當試體具表面貼覆時，脈衝量測法無法進行有效量測，因此實務量測時，宜先移除披覆。
- 十、為提高腐蝕量測精度，試體必須保持面乾飽和，不具表面披覆，量測前必須先界定主筋與箍筋位置，量測時必須區分箍筋間與鋼筋疊置處分別量測。

## 第二節 建議

### 建議一

研擬鋼筋混凝土中鋼筋腐蝕速率量測標準：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、經濟部標準檢驗局、中華民國土木工程師公會全國聯合會

目前應用於混凝土中鋼筋腐蝕量測的方法主要依照 ASTM C876 量測腐蝕電位，然而電位僅能提供腐蝕趨勢並無法判斷腐蝕速率，與實際鋼筋腐蝕情形相較，亦往往存在相當大的差異，故有必要新制定量測鋼筋腐蝕速率的標準。

就本研究所使用的脈衝電流法而言，所使用的理論已發展多年，相關儀器已有多家廠商生產，實務上現地亦已應用，國外已有相關技術文章發表，再加上本研究的成果說明該量測法可行，故目前可嘗試草擬相關量測國家標準。

建議以內政部建築研究所為主辦機關，貴所乃內政部所屬之國家級研究單位，多年來已辦理多項本研究案相關之學術研究發展計畫，可以貴所為主軸，統整各案成果，跨部會及單位綜合協商。另建議以行政院公共工程委員會、內政部營建署、經濟部標準檢驗局與中華民國土木工程師公會全國聯合會為協辦機關。行政院公共工程委員會為公共工程之主管機關，營建署乃國家營建管理及建築師主管機關，主管國家建築法規，如建築技術規則與建築法等，未來可舉辦公聽會與專家座談會討論將櫃所歷年來的相關研究成果納入公共工程與建築物品質保證確認之一環，所建議之量測設備，可作為公共工程與建築物歷年維護保養及公共安全檢查之依據。經濟部標準檢驗局主管國家標準的修訂，因此可藉由審查會議回饋研究缺失與實際需求。土木工程師從事各項土木工程之研究與指導，尤其老舊建築物的耐久評估為當今要務，而混凝土中的鋼筋腐蝕可為指標之一。因此，鋼筋腐蝕量測應具標準以供實地量測與數據分析的依循。建議公會以其具備之實務經驗及專業能力，推動標準的訂定。

## 建議二

進行腐蝕速率推估腐蝕量的研究：中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部建築研究所、中華民國土木技師公會全國聯合會

本研究的結果雖然說明腐蝕速率能夠推估腐蝕量，但亦發現其間仍有許多不確定性。為更切合實務需求，宜再進行現地試驗、蒐集資料，更進一步建立合理的分析方式。尤其，本研究的結果發現，建築常見之磁磚披覆影響腐蝕量測甚大，必須予以敲除披覆再量測，但此法耗費人力與物力。相對地，公共工程的結構物往往不具披覆，量測的難度較低，或許可藉由此類構件的量測經驗，研擬改善的量測方法及推估模式，再嘗試運用於一般建築。

建議以行政院公共工程委員會為主辦機關，可進行跨部會及單位協商，持續辦理公聽會與專家座談來瞭解實務上評估鋼筋腐蝕量的需求，以公共工程協助啟動後續研究，再將成果透過技師公會並伴隨配套措施如技師積點、時數、政府採購優勢等方式推廣於其它建築。建議以內政部建築研究所為協辦機關，可統整既有研究案成果，協助主辦機關規畫研究課題。另建議由中華民國土木技師公會全國聯合會為協辦機關，以實際現地操作，協助研究進行。

### 建議三

特殊鋼筋混凝土構造物中的鋼筋腐蝕量測研究：中長期建議

主辦機關：交通部運輸研究所

協辦機關：內政部建築研究所、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國大地工程技師公會

本研究中所使用之量測技術適用於量測混凝土中鋼筋的腐蝕，除了運用於一般建築結構物外，未來應可嘗試使用於其它特殊鋼筋混凝土構造物，如擋土牆、岩錨等大地工程中鋼筋混凝土結構物的量測。此外，根據儀器原理與說明，該技術亦可適用於量測水中鋼筋混凝土的腐蝕，故未來可用於港灣鋼筋混凝土結構物的腐蝕監測。然而，前述各項應用目前文獻闕如，亦少見現地量測範例，雖具實務應用的潛力，但仍需後續大量研究以驗證。

建議以交通部運輸研究所為主辦機關，尤其港灣結構物所處的環境往往較一般結構物嚴峻，如乾濕循環及高鹽份環境等，因此腐蝕相關研究的成果具有應用價值。建議以內政部建築研究所為協辦機關，統整近年相關研究成果並提供給主辦及其它各協辦機關參考。另建議由中華民國土木技師公會全國聯合會及中華民國大地工程技師公會為協辦機關，除可建議實務上具腐蝕量測需求的特殊構造物形式外，亦可協助現地試驗與分析數據，主辦機關再根據回饋意見與研究成果進行後續研究課題。



## 附錄一 專家座談會議紀錄與意見回覆

### 內政部建築研究所研究案

#### 專家座談會

計畫名稱：以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究

執行期間：102年2月1日-102年12月31日

計畫主持人：陳君弢 教授

時間：102年8月30日

地點：國立臺灣科技大學 工程二館 E2-222

出席人員：游德二總幹事、黃貴梅協理、林資程技師、黃然教授、趙文成教授、王仲宇教授、王朝正教授、歐昱辰教授（列席）。

#### 一、會議記錄

王教授朝正：

1. 鋼筋腐蝕是屬於比較局部性的，因此鋼筋會斷掉的並不是屬於很均勻的損失，而本計畫蠻多理論，像是把每天監測的電流多少去做積分然後再去算，這些邏輯都是屬於均勻腐蝕的邏輯，所以運用到現地局部性的腐蝕，會有一個差距。
2. 是否可以用什麼樣的方法量測到混凝土現有的化學性質上的東西，例如 pH 值、離子量等？彙整實際工程應用上在什麼狀況下混凝土怎樣的離子濃度對應怎麼樣的電位。
3. 如果有裂縫存在的時候，該怎麼去量測？
4. 在實驗室製作的混凝土跟房子外面有被地震搖過或者打到撞到的並不同，因此可以利用這個想法提一個案子利用腐蝕電流變化去現地找出裂縫然後進行修補。

趙教授文成：

1. 鋼筋是否有固定長度？還是中間某段有進行塗封之類的？
2. 為什麼選長度 10 公分？
3. 應該從孔蝕開始量測，但從孔蝕開始很顯然就會小於 10 公分，造成量不到的情況發生，這就變成了盲點。我認為應該可製作一根梁並施加彎矩讓他開裂到 ACI 規定危害的裂縫寬度然後再進行腐蝕，然後再泡在水裡這樣反而比較會像真實的狀況。
4. 必須要大到 10 公分才量的到？
5. 那這 10 公分的解析度到多少？
6. 應該朝跟實務上怎麼結合的方向會比較有意義。現今的房屋多貼有磁磚，磁磚的填縫如果沒有填好或者時間久了填縫會剝落，剝落之後有害離子滲入，也許找到那種的狀況，從那邊去量測，說不定比較有機會量測到結果，另外可能就是選擇較高吸水率的磁磚。
7. 如果在有別於本計畫試驗的條件之下結果是不是也是這樣，而且是否會與混凝土的級配有關係，當在現地量測時根本就不知道混凝土的級配因此就會產生誤差，我認為可能要在加以說明混凝土的級配、水灰比及粗細粒料含量等各會影響的誤差分別為何。
8. 為什麼誤差的來源有 10 倍和 5 倍的不同，誤差來源及原因是什麼？我認為可以在進一步探討。
9. 當混凝土的強度提升時，混凝土就不容易腐蝕，那水灰比多少以下不容易腐蝕？
10. 要考慮磁磚底下還有一層水泥砂漿或液膠泥，因為為了要黏著磁磚所以黏性較高可能都是不透水的，因此磁磚吸水率低然後底下又有一層不透水的，可能會有完全量測不到的情形發生。

黃教授然：

1. 在現地測量時無法得知保護層、水灰比等資訊，不像在實驗室量測來的好分析，因此還是希望能跟實務結合，研究出在現地量測時分析的準則。
2. 如果未通電或者在相同的通電時間下，依保護層厚度的不同，是否可以看出並統整出脈衝訊號的差異值，如果可以將水灰比、保護層厚度及磁磚厚度等這些外在環境的因子與脈衝訊號的關聯建立起來，會讓整個計畫有一個具體的結果。

王教授仲宇：

1. 建議規劃一些實驗以建立腐蝕生成物和混凝土破裂之關係，例如在試體表面黏貼應變計。
2. 由於腐蝕試驗不適合使用電阻式應變計，因此建議開發使用光纖光柵式(FBG)應變計，其具有耐腐蝕及信號敏感清晰之特點。
3. 腐蝕生成物之演化，成長過程可考慮以下之方法：  
(1) 使用 FBG 圍束套(2) 運用  $\gamma$ -ray 照相(3) 在試體內部分層裝置碳棒觀察氯離子擴散及中性化之速率。
4. 總評建議：這是一非常基本而實用之研究案，必須規劃詳盡構思清楚，否則大量時間及人力、資源投入後，若再發現缺漏將會十分遺憾及可惜。

台灣陶瓷工業同業公會 游總幹事德二：

1. 建議用吸水率 6% 和 10% 以上的磁磚，因為吸水率較高對於鋼筋混凝土腐蝕的影響會比較大。
2. 填縫處影響最大，因為磁磚的吸水率都會比填縫劑低，因此會從填縫的地方滲入。
3. 建議使用吸水率至少 6% 以上的磁磚，然後再依據需求與吸水率 3% 或 0.5% 的做比較，尺寸方面一定要有選用二丁掛，因為目前最常用，其他的可以選馬賽克或再比二丁

掛大尺寸的磁磚一起做比較。

台灣省土木技師公會 林技師資程：

1. 夯實度、氣密度可能也會是一個影響因素。

台灣區磁磚發展協會 黃協理貴梅：

1. 建議外牆的填縫要做大一點，因為台灣屬於地震帶會擠壓，並不適合作密縫，因此填縫寬度建議要超過 0.5 cm。
2. 建議可以用陶質丁掛，然後與吸水率低的再一起做比較。

## 二、意見與回覆對照表

專家	審查意見	意見回覆
王朝正 教授	一. 鋼筋腐蝕是屬於比較局部性的，因此鋼筋會斷掉的並不是屬於很均勻的損失，而本計畫蠻多理論，像是把每天監測的電流多少去做積分然後再去算，這些邏輯都是屬於均勻腐蝕的邏輯，所以運用到現地局部性的腐蝕，會有一個差距。	本研究中已限定通電加速鋼筋腐蝕的長度，並假設其為均勻腐蝕。當試驗完成並取出鋼筋後，的確發現整個鋼筋幾乎呈現均勻腐蝕，因此可據此探討該電化學法量測是否可靠。於現地使用時，即使非均勻腐蝕，但每個量測點位的有效量測長度大約等同電極大小，故應可控制誤差範圍，但如何進一步精確量測孔蝕位置及孔蝕的腐蝕速率有待後續探討。
	二. 是否可以用什麼樣的方法量測到混凝土現有的化學性質上的東西，例如 pH 值、離子量等？彙整實際工程應用上在什麼狀況下混凝土怎樣的離子濃度對應怎樣的電位。	目前試驗過程中皆同時量測腐蝕電位，但結果發現其變化無法對應腐蝕電流密度，亦即低電位並不全然對應高腐蝕電流密度。過程中，部份試體亦進行粉末取樣，未來可進行 pH 及離子濃度量測，然而因其屬於破壞性量測，故現地上不易施行。
	三. 如果有裂縫存在的時候，該怎麼去量測？	目前發現小裂縫的存在對於量測值的影響不大，但如果發生鏽水逸出的量測，則逸出處的量測值明顯不穩定或無法量測。鏽水逸出係緣於鋼筋嚴重鏽蝕，此時儀器無法適當極化鋼筋及進行量測。

	<p>四. 在實驗室製作的混凝土跟房子外面有被地震搖過或者打到撞到的並不同，因此可以利用這個想法提一個案子利用腐蝕電流變化去現地找出裂縫然後進行修補。</p>	<p>感謝建議，未來可嘗試進行小型試驗，視結果探討可能性，再規畫完整的提案。</p>
<p>趙文成 教授</p>	<p>一. 鋼筋是否有固定長度？還是中間某段有進行塗封之類的？</p>	<p>研究中鋼筋的長度固定為 10 公分。</p>
	<p>二. 為什麼選 10 公分？</p>	<p>電極的尺寸為 10 公分。根據儀器量測原理，有效量測長度約等同於電極大小，故限定鋼筋腐蝕長度為 10 公分。</p>
	<p>三. 應該從孔蝕開始量測，但從孔蝕開始很顯然就會小於 10 公分，而造成量不到的情況發生，這就變成了盲點，我認為應該可製作一根梁並施加彎矩讓他開裂到 ACI 規定危害的裂縫寬度然後再進行腐蝕，然後再泡在水裡這樣反而比較會像真實的狀況。</p>	<p>儀器可量測極小的腐蝕電流，因此即始孔蝕發生時，仍可觀測到量測值變化，但受限於儀器設計，目前僅能推測腐蝕長度段的平均腐蝕。目前本研究的目的係探討試驗法的適用性，因此試體儘可能符合量測理論假設，應不具明顯裂縫。裂縫開裂下，腐蝕量測值的變化值得後續探討。</p>
	<p>四. 必須要大到 10 公分才量的到？</p>	<p>依儀器原理，鋼筋長度小於 10 公分時亦可量測，儀器可設定量測鋼筋長度。</p>
	<p>五. 那這 10 公分的解析度到多少？</p>	<p>由於儀器量測電極具保護電流，故其限定的量測長度約 10 公分，但誤差多少無法確知，推測應與保護層的性質相關，以目前的試驗設計不易驗證。</p>
	<p>六. 應該朝跟實務上怎麼結合的方向會比較有意義，現今的房屋多貼有磁磚，磁磚的填縫如果沒有填好或者時間久了填縫會剝落，剝落之後有害離子滲入，也許找到那種的狀況，從那邊去量測，說不定比較有機會量測到結果，另外可能就是選擇較高吸水率的磁磚。</p>	<p>為與實務結合，故本研究的後期即規劃量測具表面瓷磚貼覆的柱內鋼筋，量測時電極將涵蓋量測處的灰縫。</p>

	<p>七. 如果在有別於本計畫試驗的條件之下結果是不是也是這樣，而且是否會與混凝土的級配有關係，當在現地量測時根本就不知道混凝土的級配因此就會產生誤差，我認為可能要在加以說明混凝土的級配、水灰比及粗細粒料含量等各會影響的誤差分別為何。</p>	<p>由於量測電流必須透過保護層，故推測保護層的級配必然影響試驗結果，而目前的結果即顯示水灰比的影響相對於保護層厚度的影響大，未來會再考慮粗細粒料體積的影響。</p>
<p>趙文成教授</p>	<p>八. 為什麼誤差的來源有 10 倍和 5 倍的不同，誤差來源及原因是什麼？我認為可以在進一步探討。</p>	<p>推測與混凝土的阻抗有關，阻抗太大時，不易極化鋼筋，故量測電流不穩定，造成誤差過大。</p>
	<p>九. 當混凝土的強度提升時，混凝土就不容易腐蝕，那水灰比多少以下不容易腐蝕？</p>	<p>目前試驗結果發現，水灰比大概在 0.4 以下時鋼筋較不容易腐蝕。</p>
	<p>十. 要考慮磁磚底下還有一層水泥砂漿或液膠泥，因為為了要黏著磁磚所以黏性較高可能都是不透水的，因此磁磚吸水率低然後底下又有一層不透水的，可能會有完全量測不到的情形發生。</p>	<p>由於大多數磁磚的吸水率較混凝土低，推測主要的量測電流仍由灰縫滲出。當灰縫面積比例過小時，的確可能發生量測不到的情形。</p>
<p>黃然教授</p>	<p>一. 在現地測量時無法得知保護層、水灰比等資訊，不像在實驗室量測來的好分析，因此還是希望能跟實務結合，研究出在現地量測時分析的準則。</p>	<p>由於量測時，儀器的一端必須接於鋼筋，故敲除部份保護層後可量測保護層厚度。以目前的結果而言，保護層厚度在 6 cm 以內時，其對量測值的影響不大。未來將統整本研究的試驗結果，草擬現地量測的準則。</p>
	<p>二. 如果未通電或者在相同的通電時間下，依保護層厚度的不同，是否可以看出並統整出脈衝訊號的差異值，如果可以將水灰比、保護層厚度及磁磚厚度等這些外在環境的因子與脈衝訊號的關聯建立起來，會讓整個計畫有一個具體的結果。</p>	<p>脈衝訊號值反應鋼筋腐蝕的情況，亦用以計算腐蝕電流密度，故不同的通電時間可造成不同程度的鋼筋腐蝕，其訊號值並不同。保護層的影響如前所述，在較小的保護層下，量測值似不受保護層厚度的影響。磁磚厚度非本研究規畫的試驗因子，目前著重於磁磚種類及灰縫比例的影響。未來成果將整合腐蝕速率與各試驗參數間的關係。</p>

游德二 總幹事	一. 建議用吸水率 6% 和 10% 以上的磁磚，因為吸水率較高對於鋼筋混凝土腐蝕的影響會比較大。	未來部份試體將貼覆該類磁磚。
	二. 填縫處影響最大，因為磁磚的吸水率都會比填縫劑低，因此會從填縫的地方滲入。	目前的假設即如此，故未來量測時將涵蓋灰縫而非全部磁磚。
	三. 建議使用吸水率至少 6% 以上的磁磚，然後再依據需求與吸水率 3% 或 0.5% 的做比較，尺寸方面一定要有選用二丁掛，因為目前最常用，其他的可以選馬賽克或再比二丁掛大尺寸的磁磚一起做比較。	視研究經費及時程，考慮未來將增加試體數量，貼覆不同尺寸及吸水率的磁磚。
林資程 技師	一. 夯實度、氣密度可能也會是一個影響因素。	此兩因子反應在混凝土的阻抗，只要儀器可適當極化鋼筋，區分出混凝土的阻抗即可獲得可靠量測值。
黃桂梅 協理	一. 建議外牆的填縫要做大一點，因為台灣屬於地震帶會擠壓，並不適合作密縫，因此填縫寬度建議要超過 0.5 cm。	目前規畫以常見的磁磚貼覆法為主，灰縫的大小應是影響因子之一，故將視研究經費與時程，考慮增加該試驗參數。
	二. 建議可以用陶質丁掛，然後與吸水率低的再一起做比較。	目前規畫以常用的磁磚為主，視研究經費及時程，未來考慮將增加試體數量，並貼覆不同尺寸及吸水率的磁磚。
王仲宇 教授	<p>一. 建議規劃一些實驗以建立腐蝕生成物和混凝土破裂之關係，例如在試體表面黏貼應變計。</p> <p>二. 由於腐蝕試驗不適合使用電阻式應變計，因此建議開發使用光纖光柵式 (FBG) 應變計，其具有耐腐蝕及信號敏感清晰之特點。</p> <p>三. 腐蝕生成物之演化，成長過程可考慮以下之方法：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用 FBG 圍束套</li> <li>2. 運用 <math>\gamma</math>ray 照相</li> </ol>	目前選用電化學量測法的原因主要考慮到儀器設備費用、能否大範圍量測、能否長期監測、能否連續監測等問題，但所建議的方法值得後續研究，交叉比對試驗結果後，或許更能準確判斷腐蝕位置及腐蝕程度。

	<p>3. 在試體內部分層裝置碳棒觀察氯離子擴散及中性化之速率。</p> <p>四. 總評建議：這是一非常基本而實用之研究案，必須規劃詳盡構思清楚，否則大量時間及人力、資源投入後，若再發現缺漏將會十分遺憾及可惜。</p>	
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

國立臺灣科技大學

內政部建築研究所委託研究案

以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究-專家座談會

壹、會議時間：102年8月30日(星期五) 11:00-13:00

貳、會議地點：E2-222

參、出席人員：

	出席專家	單位	簽到
出席專家	游德二總幹事	台灣陶瓷工業同業公會	游德二
	黃貴梅協理	台灣區磁磚發展協會	黃貴梅
	林資程技師	台灣省土木技師公會	林資程
	黃然教授	國立海洋大學河海工程系	黃然
	趙文成教授	國立交通大學土木工程系	趙文成
	王仲宇教授	國立中央大學土木工程系	王仲宇
	王朝正教授	國立台灣科技大學機械工程系	王朝正
計畫主持人	陳君弢教授	國立台灣科技大學營建工程系	陳君弢
列席人員	歐昱辰教授	國立台灣科技大學營建工程系	歐昱辰
工作人員	吳靖賢	國立台灣科技大學營建工程系	吳靖賢
	韋昀孜	國立台灣科技大學營建工程系	韋昀孜
	莊宜捷	國立台灣科技大學營建工程系	莊宜捷
	顏永霖	國立台灣科技大學營建工程系	顏永霖
	李慶軍	國立台灣科技大學營建工程系	李慶軍



## 附錄二 期中審查會議紀錄與意見回覆

### 壹、期中審查會議紀錄

召開本所 102 年度委託研究「鋼筋混凝土於中性化及氯離子複合作用下腐蝕劣化之研究」、「以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究」暨協同研究「取樣位置與萃取方式對鋼筋混凝土氯離子含量與檢測方法影響之研究」等 3 案期中審查會議紀錄

一、時 間：102 年 7 月 10 日（星期三）下午 2 時 30 分

二、地 點：本所簡報室

三、主持人：何所長明錦

記錄：李台光、厲妮妮、林志彥

四、出席人員：如簽到單

五、簡報內容：略。

六、綜合討論意見：

#### （一）「鋼筋混凝土於中性化及氯離子複合作用下腐蝕劣化之研究」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

1. 本研究蒐集之資料與文獻，鋼筋腐蝕的效應與防範腐蝕的策略，均符合預期成果。

高教授健章：

1. 試體個數與組數應有量化數據，如預計總數與已完成之數量，可具體的呈現研究進展情形。
2. 「碳化」改為「碳酸化」可能較為切題。
3. 預期成果第 3 項之試體製作與試驗較費力費時，應把握進度。

廖組長肇昌：

1. 初步研究成果驗證學理上有關在高鹼性環境下，鋼筋在鹽化物含量高的條件下，腐蝕速率較快（高）的結論。

就此部分，能否將鹽化物(NaCl)的濃度，可轉換成氯離子含量，如每立方的混凝土含多少公斤的氯離子，則將有助於目前有關硬固混凝土在分析中性化及氯離子含量間的腐蝕速率的判斷，並進一步建立 pH 值與氯離子間的關係曲線。

2. 有關簡報第 25 頁，期中報告第 41 頁表 2.3 中， $[Cl^-]/[OH^-]>0.6$  的腐蝕臨界值，在實務應用上要如何在硬固混凝土上進行判斷檢測其是否正處於鋼筋腐蝕的初始狀態。

沈教授永年：

1. 本研究針對氯離子鹽害及中性化之複合作用下，探討其對添加飛灰與水淬爐石粉混凝土之腐蝕行為，具有實用性與貢獻性。
2. 期中簡報第 17 頁提及與水灰比無關，請說明。
3. 建議期末報告提出 $[Cl^-]/[OH^-]$ 大於多少時，鋼筋就會產生腐蝕。

詹教授穎雯：

1. 本案之實驗計畫步驟與細節並不詳細，無法從報告書中瞭解實際實驗內容：(1)第一階段是否為配置溶液浸泡鋼筋？(2)鋼筋重量損失量測之頻率、時間為何？如何計算得鋼筋腐蝕速率？(3)簡報中提到之溶液 pH 變化是如何測得？代表意義為何？
2. 第 2 階段之試體與實驗計畫在簡報中並未提及，詳細內容亦請說明：  
(1)依材料變數表 3.3，總計會有 360 組(5×4×2×3×3)是否正確？每組會有幾個圓柱試體？以這樣龐大的試體數量，如何進行加速中性化(圖 3.1 設備)？(2)試體中是否埋設鋼筋？如無，何以進行半電池電位、脈衝法量測、四極式電阻量測等電學量測？(3)所有試驗之試驗頻率或齡期為何？

李教授釗：

1. 建議量測 $[Cl^-]/[OH^-]$ 是否大於 0.6。
2. 混凝土中的鋼筋若是在形成鈍態保護膜後，再受外來氯離子侵蝕，因此鋼筋宜先浸泡鹼性溶液，待生成鈍態保護膜後再加入氯離子。
3. 試驗用的 20 公分鋼筋除一般的腐蝕行為外，亦包括鋼筋切斷面的應力腐蝕，故試驗前宜將兩端部分先做防蝕。
4. 飛灰取代量 40% 太高，爐石取代量 30% 太少。

陳組長建忠：

1. 請檢討國家標準各項標準，有關侵蝕劣化行為之修正建議。
2. 依期中報告書文獻分析，環境溫濕度亦是重要效應，因此在各實驗時以及結果分析表達，請予以量測表達。
3. 報告中所提為中小學梁柱腐蝕，請嘗試推演至一般住宅或商用建築。

中華民國土木技師公會全國聯合會 蔡得時技師（書面意見）：

1. 本文研究目的第 5 點：培育鋼筋混凝土抗腐蝕技術相關人才，建議於期末報告列出培育教材大綱。
2. 建議補充期初審查意見及回復。
3. 部分圖表有簡體字，請修正。並建議於試體計畫中將試體數量稍作描述。
4. 請確認試驗變數 pH 值係為 7、9、11、13.5 或 9、11、13。

研究單位回應：

1. 本研究第一階段鋼筋浸泡於不同狀況下之溶液，模擬混凝土孔隙溶液之情形。
2. 本研究鋼筋浸泡 28 天後量測後將表面鏽蝕去除，透過所量測重量損失根據 ASTM 規範中建議式計算出其腐蝕速率。

3. 本研究透過 pH meter 量測得知，所代表的為溶液 pH 值的變化情形。
4. 由於一般較常用「碳化」表示，因此會再斟酌考量是否要改為「碳酸化」。
5. 本研究於期末報告中，會將國家標準各項標準有關侵蝕劣化行為資料進行探討。另由於本實驗變數較多試體數量較大，若有餘裕會再多針對溫溼度對於腐蝕的影響，進行討論。
6. 本研究於期末報告中，將會嘗試建立 pH 值與氯離子間的關係曲線。
7. 於期末報告中會針對形成鈍態保護膜後，再受外來氯離子侵蝕，與未形成鈍態保護膜後，就受外來氯離子侵蝕兩者之差異進行比較。
8. 本研究會針對兩端由於熱處理，而造成鏽蝕較嚴重之情形進行排除後，再進行腐蝕行為之評估，並會探討添加摻料後對於鋼筋混凝土腐蝕行為之影響。
9. 本研究試驗變數 pH 值為 7、9、11、13，期中報告中誤植部分，將於期末報告書改正。

## (二)「以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

按鋼筋混凝土表面磁磚被覆下之鋼筋腐蝕行為及量測方法，為本研究案預期成果之一。以目前國內的建築現況，磁磚選樣應以馬賽克、二丁掛、方塊磚及小口磚……等常見式樣；並建請邀集有施工經驗之團體，提供實務建議。

高教授健章：

1. 請補充國內外相關之近期文獻回顧。
2. 結構韌性構件中，其箍筋係為環繞主筋之形式，採 90 度或 135 度彎折，與本案實驗有所差異。彎折處會發生應力腐蝕，此因素宜加考量。

廖組長肇昌：

1. 依本研究實驗結果，以小尺寸構件量測鋼筋腐蝕情形，與混凝土厚度、水灰比皆有相互影響關係。建議未來可歸納出何種厚度、水灰比之混凝土，較適合採用之鋼筋腐蝕量測法。另外，於進行量測時，是否須使混凝土之含水量處於適當狀態？亦請說明。
2. 實尺寸構件較接近真實構件。建議就研究結果的趨勢、態樣及變異性加以歸納，提出量測鋼筋腐蝕之建議及其限制條件。

沈教授永年：

1. 本研究以電化學量測法探討保護層厚度、配比及含水量等因子間之相互關係，並提出現地鋼筋混凝土之鋼筋腐蝕量測標準步驟，具有重要性與貢獻性。
2. 本案初步結論提及水灰比越低時，量測值越不穩定，數據無明顯趨勢。建議於期末報告中述明電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕行為之適用條件（例如水灰比之適用範圍）。
3. 若箍筋與主筋之間，以彎鈎取代一般交疊方式，其腐蝕行為差異為何？

詹教授穎雯：

1. 本案實驗將鋼筋埋設於試體之中，建請說明鋼筋露出混凝土之部分是否採取加以保護、隔絕措施？鋼筋之鏽蝕是從內部開始，亦或由鋼筋外露啟動？氯離子入滲混凝土之行為與鋼筋腐蝕是否相關？
2. 建議評估或檢討氯離子入滲速率與鋼筋鏽蝕速率是否合理。
3. 建請說明或驗證通電流含氯鹽溶液對混凝土試體中鋼筋腐蝕行為之影響，是在實驗計畫所設定之狀態，而非為其他電流造成之干擾，否則很難建立鋼筋腐蝕與氯鹽濃度之相關性，導致無法評估腐蝕行為對構件力學行為影響之相關性。

李教授釗：

1. 請於報告書中附加摘要。
2. 一般腐蝕電位量測的變異來源並非含水量，而是部分乾燥的問題。建議在不同含水量狀況下，考慮快速潮濕或快速飽和的方法。
3. 磁磚表面量測腐蝕的同時，建議亦在接縫處量測。

陳組長建忠：

1. 建請提出國家標準有關鋼筋腐蝕劣化量測的草案或修正建議具體條文。
2. 本案以電化學法所進行的實驗，發現試體在 5、6、7 天腐蝕幅度大增，推測為鏽水產生，其原因宜繼續查證（如加測含水量）。而量測僅進行 7 天，宜請拉長量測時間。
3. 報告提及中小學校梁柱腐蝕，請嘗試推演至一般住宅、商用建築。
4. 磁磚貼附影響腐蝕劣化之效應為何？以及試驗取樣方法為何？請予考量。

中華民國土木技師公會全國聯合會 蔡得時技師（書面意見）：

1. 建議將期初審查意見及回覆補充。
2. 建議於期末報告時研擬出現地腐蝕量測的標準程序，供作工程界檢測高氯離子混凝土建築物之參考。
3. 建議對於所需試驗設備之操作及計算能做進一步之描述。
4. 研究內容符合預期目標。

研究單位回應：

1. 就報告內容而言，本研究將針對摘要及文獻回顧加強改進。
2. 就目前試驗技術而言，試驗過程中所有試體外露部分及介面處均塗封，以確保鏽蝕位置於內部。由於外加腐蝕的電流密度遠大於氯離子造成的局部電流密度，故試體之鏽蝕主要是受外加電流影響，實際試驗結果亦呈現較接近均勻腐蝕。此外，當鏽水溢出時，代表鋼筋已發生嚴重的腐蝕情形，內埋鋼筋已與外界直接形成通路，故量測值

極不穩定，也因此考量量測技術的限制。本研究以鏽水溢出時為破壞指標，於鏽水溢出後即停止試驗，對於多數試體，通電 7 天內即溢出鏽水，故多數試驗時間僅及 7 天。此外，含水量為另一重要影響因子，目前快速潮濕的方法係採用在試體表面噴灑水，使得試體達到飽和狀態。至於如何有效控制保護層深度內部分乾燥，由於研究時間有限，將待後續研究探討相關乾燥技術可能性。

3. 就後續試驗技術而言，磁磚的阻抗遠較混凝土為大，故預期僅於磁磚表面量測時，並無法得到可靠數據。此外，有害因子主要由灰縫處進入，故本研究會考量在磁磚表面及灰縫處量測，並嘗試在表面開洞進行量測。本研究後續將舉辦專家座談會，討論磁磚的選擇，配合試體尺寸，選用適當磁磚。
4. 就數據資料分析而言，足尺寸試驗的結果皆同時記錄彎鉤的位置。但由於數據量較為龐大，目前還在分析彎鉤處之影響，未來數據呈現時會加註彎鉤處。
5. 就預期成果而言，本研究將根據各材料及量測因子之試驗結果，建議現地腐蝕的量測步驟及適用條件。此外，本研究的成果著重於鋼筋腐蝕量測技術，主要假設腐蝕量測跟材料因素而非結構形式相關，預期可適用於各類結構物。

(三)「取樣位置與萃取方式對鋼筋混凝土氯離子含量與檢測方法影響之研究」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

1. 本研究預期成果、試驗方法、檢測方法與標準手冊、評估方法等相當明確。
2. 本研究為探討硬固混凝土中氯離子含量檢測方法之標準化、取樣量、萃取方式與精密度分析，需凝聚產官學的共識。

高教授健章：

1. 本研究當採鑽心取樣方法時，伴隨磨擦生熱之熱效應影響如何？請補述。

2. 本研究成果可能影響規範與民法賠償層面，應審慎嚴謹。
3. 進度良好如預期。

廖組長肇昌：

1. 本研究之取樣是否會有尺寸效應現象？若將來採用電鑽取粉末方法所測得之氯離子含量是否需要修正？
2. 本研究提及全斷面磨粉會將貯存在粗、細粒料內的氯離子(Cl<sup>-</sup>)一併萃取出，然在硬固混凝土內，此部分之粗、細粒料應不至於對鋼筋腐蝕有影響，故此法的結果對鋼筋腐蝕的氯離子含量臨界值是否偏保守？

沈教授永年：

1. 本研究中蒐集彙整各國之混凝土氯離子試驗方法，加以比較分析，並以取樣位置及萃取方式（3種）探討對鋼筋混凝土中氯離子含量與檢測方法之影響。研究具有工程應用之實用性與重要性。
2. 本研究中新拌混凝土氯離子含量試驗結果低於拌合時外加的氯離子量，其原因宜加以說明。
3. 本研究期中報告初步研究結論與發現中，第7點指出在結構單元之取樣位置方面，梁試體面海與背海側，底部與頂部之差異並不大（平均為1.04與1.02倍）。故建議題目以「取樣方法」取代「取樣位置」，應較為適當且切題。

詹教授穎雯：

1. 本研究計畫明確詳盡，整體面規劃得合理可行。
2. 請說明為何新拌混凝土所測得之氯離子濃度小於實際量，但其硬固混凝土之氯離子濃度測出值卻又與添加量相接近？
3. 本研究採磨粉與鑽粉等兩種取樣方法之探討極有意義，樂觀其成。

李教授釗：

1. 本研究之期中報告宜增加摘要。
2. 本研究以震動電鑽鑽孔取樣，宜考量鑽孔深度應超過粒料最大粒徑約多少倍後才可降低變異性。

3. 本研究期中報告中，「骨材」宜改為「粒料」，以符合中華民國國家標準(CNS)。
4. 建議本研究探討最大粒徑的影響。
5. 本研究之震動電鑽取樣方法在實務上較易應用。

陳組長建忠：

1. 請取得購屋消費糾紛案例，做為取樣之參考（如取樣是明顯剝落處或重要結構位置）。
2. 請檢討各國及台灣之國家標準，並提出國家標準修正草案具體文字。
3. 本研究中迴歸方程式，為何是以直線迴歸？如何推論而得？是否需考量常數項？
4. 本研究期中報告第 2 章之參考文獻第 15 頁，敘述 91 年已訂硬固混凝土試驗方法，但大眾多以中華民國國家標準 CNS 3090 新拌為標準，似指不妥，其原由請予敘明。

中華民國土木技師公會全國聯合會 蔡得時技師（書面意見）：

1. 本研究進度及內容均符合研究目的所述。
2. 本研究期中報告內文標示之文獻與第 77 頁中參考文獻不符合，請修正。
3. 本研究期中報告第 4 頁第 1 行敘述相關統計資料，如根據 2012 統計等，請補參考資料。
4. 本研究期中報告第 14 頁圖 2-3 不清楚，建議研究團隊重新繪製。
5. 本研究利用放置沿海區域達 6 年之梁試體進行試驗做比較，值得肯定。
6. 期許本研究成果可發展成為目前法院所謂「海砂屋」訴訟之檢驗方式。

研究單位回應：

1. 有關熱效應之影響，將於期末報告彙整說明。

2. 新拌混凝土低於拌合時外加的氯離子量原因可能是水泥水化反應生成物的吸附作用。後續將探討吸附量的關聯性，並確認試驗數據。
3. 後續有關標準手冊草案或國家標準修正草案具體文字訂定將舉行專家座談會議來討論，使草案更為嚴謹。
4. 有關尺寸效應的影響，將會於期末報告分析說明。
5. 計畫後續參考委員意見，將部分試驗內容更改為實務上較易應用的震動電鑽取樣深度與試驗結果的探討。
6. 有關文字疏漏、常用名詞、與摘要將於期末報告更正。
7. 有關文字疏漏、常用名詞、與摘要將於期末報告更正。

七、會議結論：

- (一) 請業務單位將與會專家學者及出席代表意見詳實記錄，以供研究單位參考。研究單位應於期末報告中針對期中審查意見逐一補充說明與回應，如期如質完成研究計畫。
- (二) 本次會議 3 案期中報告，經審查結果原則通過，委託研究計畫請儘速依約辦理請領第 2 期款；協同研究計畫請研究單位注意控制經費核銷。並請本所業務單位應依規定時程管控研究進度。

八、散會：下午 4 時 50 分。

## 貳、意見回覆對照表

審查委員	審查意見	意見回覆
王總幹事榮吉	1. 按鋼筋混凝土表面磁磚被覆下之鋼筋腐蝕行為及量測方法，為本研究案預期成果之一。以目前國內的建築現況，磁磚選樣應以馬賽克、二丁掛、方塊磚及小口磚……等常見式樣；並建請邀集有施工經驗之團體，提供實務建議。	1. 本研究後續將舉辦專家座談會，討論磁磚的選擇，配合試體尺寸，選用適當磁磚。
高教授健章	1. 請補充國內外相關之近期文獻回顧。 2. 結構韌性構件中，其箍筋係為環繞主筋之形式，採90度或135度彎折，與本案實驗有所差異。彎折處會發生應力腐蝕，此因素宜加考量。	1. 本研究將於期末報告及簡報加強改進。 1. 本研究中足尺寸試體的設計係參考既有國內中小學建築耐震研究的相關報告，故箍筋形式可能與新近設計不同。 2. 初步試驗發現，彎折處的確腐蝕較嚴重，但箍筋腐蝕並非本研究之重點，目前技術仍不適用於彎折處的量測。
廖組長肇昌	1. 依本研究實驗結果，以小尺寸構件量測鋼筋腐蝕情形，與混凝土厚度、水灰比皆有相互影響關係。建議未來可歸納出何種厚度、水灰比之混凝土，較適合採用之鋼筋腐蝕量測法。另外，於進行量測時，是否須使混凝土之含水量處於適當狀態？亦請說明。	1. 期末報告中將統整適用條件。 2. 量測時，試體保護層必須呈面乾飽和態，否則無法形成通路。

	2. 實尺寸構件較接近真實構件。建議就研究結果的趨勢、態樣及變異性加以歸納，提出量測鋼筋腐蝕之建議及其限制條件。	1. 期末報告終將歸納試驗結果，提出適用條件及可能誤差範圍。
沈教授永年	1. 本研究以電化學量測法探討保護層厚度、配比及含水量等因子間之相互關係，並提出現地鋼筋混凝土之鋼筋腐蝕量測標準步驟，具有重要性與貢獻性。	1. 感謝委員指教，希望本研究之成果能協助業界能更妥善地量測鋼筋腐蝕。
	2. 本案初步結論提及水灰比越低時，量測值越不穩定，數據無明顯趨勢。建議於期末報告中述明電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕行為之適用條件(例如水灰比之適用範圍)。	1. 本研究將於期末報告中歸納結果，說明適用條件。
	3. 若箍筋與主筋之間，以彎鉤取代一般交疊方式，其腐蝕行為差異為何？	1. 預期使用彎鉤形式時，由於兩者接觸面積大，故預期箍筋鏽蝕更加嚴重，主筋腐蝕量測越不準確。
詹教授穎雯	1. 本案實驗將鋼筋埋設於試體之中，建請說明鋼筋露出混凝土之部分是否採取加以保護、隔絕措施？鋼筋之鏽蝕是從內部開始，亦或由鋼筋外露啟動？氯離子入滲混凝土之行為與鋼筋腐蝕是否相關？	1. 本研究中所有的試體外露部份及介面處均塗封，以確保鏽蝕位置發生於內部。 2. 由過去的研究成果可知，氯離子與鋼筋腐蝕相關，本研究後續將探討兩者之相關性。
	2. 建議評估或檢討氯離子入滲速率與鋼筋鏽蝕速率是否合理。	1. 本研究後續將探討氯離子濃度與鋼筋腐蝕間的關係。

<p>李教授釗</p>	<p>1. 請於報告書中附加摘要。</p>	<p>1. 本研究將於期末報告書中新增摘要。</p>
	<p>2. 一般腐蝕電位量測的變異來源並非含水量,而是部分乾燥的問題。建議在不同含水量狀況下,考慮快速潮濕或快速飽和的方法。</p>	<p>1. 目前快速潮濕的方法係採用在試體表面噴灑水,使得試體達到飽和狀態。至於如何有效控制保護層深度內部分乾燥,由於研究時間有限,將待後續研究探討相關乾燥技術的可能性。</p>
	<p>3. 磁磚表面量測腐蝕的同時,建議亦在接縫處量測。</p>	<p>1. 本研究預定量測的方式即放置電極於灰縫處量測。</p>
<p>陳組長建忠</p>	<p>1. 建請提出國家標準有關鋼筋腐蝕劣化量測的草案或修正建議具體條文。</p>	<p>1. 本研究將參考研究成果填寫 CNS 草案申請表格。</p>
	<p>2. 本案以電化學法所進行的實驗,發現試體在5、6、7天腐蝕幅度大增,推測為鏽水產生,其原因宜繼續查證(如加測含水量)。而量測僅進行7天,宜請拉長量測時間。</p>	<p>1. 當鏽水溢出時,代表鋼筋已發生嚴重的腐蝕情形,內埋鋼筋已與外界質直接形成通路,故量測值極不穩定,也因此考量量測技術的限制,本研究以鏽水溢出時為破壞指標,於鏽水溢出後即停止試驗,對於多數試體,通電7天內即溢出鏽水,故多數試驗時間僅及7天。</p>
	<p>3. 報告提及中小學校梁柱腐蝕,請嘗試推演至一般住宅、商用建築。</p>	<p>1. 本研究的成果著重於鋼筋腐蝕量測技術,主要假設腐蝕量測跟材料因素而非結構形式相關,預期可適用於各類結構物。</p>
	<p>4. 磁磚貼附影響腐蝕劣化之效應為何?以及試驗取樣方法為何?請予考量。</p>	<p>1. 就後續試驗技術而言,磚的阻抗遠較混凝土大,故預期僅於磁磚表面量測時,並無法得到可靠數據。此外,有害因子主要由灰縫處</p>

		<p>進入，故本研究會考量在磁磚表面及灰縫處量測，並嘗試在表面開洞進行量測。本研究後續將舉辦專家座談會，討論磁磚的選擇，配合試體尺寸，選用適當磁磚。</p>
蔡技師得時	1. 建議將期初審查意見及回覆補充。	1. 本研究於期末報告補充改進。
	2. 建議於期末報告時研擬出現地腐蝕量測的標準程序，供作工程界檢測高氯離子混凝土建築物之參考。	1. 本研究於期末報告專節敘述現地腐蝕量測的標準程序。
	3. 建議對於所需試驗設備之操作及計算能做進一步之描述。	1. 本研究將於第三章進一步描述儀器設備規格與操作人員需求，於專節敘述現地腐蝕量測數據的分析方式。
	4. 研究內容符合預期目標。	1. 感謝審查委員對本研究案期中成果的肯定。

參、審查簽到表

內政部建築研究所

召開本所 102 年度委託研究「鋼筋混凝土於中性化及氯離子複合作用下腐蝕劣化之研究」、「以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究」暨協同研究「取樣位置與萃取方式對鋼筋混凝土氯離子含量與檢測方法影響之研究」等 3 案期中審查會議簽到簿

時 間：102 年 7 月 10 日(星期三) 下午 2 時 30 分			
地 點：本所簡報室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)			
主 席：何所長明錦		記 錄：林曉(副) 李台堯	
出席人員	簽 到 處	代 理 人	
		職 稱	簽 到 處
方教授一匡	(請假)		
李教授釗	李 釗		
沈教授永年	沈永年		
陳教授建謀	(請假)		
高教授健章	高健章		
詹教授穎雯	詹穎雯		
廖組長肇昌	廖肇昌		
趙教授文成	(請假)		
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	(書面意見)		
台灣省建築材料商業同 業公會聯合會	王榮吉		
黃教授然	黃 然		

[開 FC1020005231S]

陳教授君強	洪君強		
楊教授仲家	楊仲家		
國立臺灣海洋大學	李俊		
國立臺灣科技大學	陳石		
陳組長建忠	陳建忠		
李研究員台光	李台光		
厲研究員妮妮	厲妮妮		
林研發替代役志彥	林志彥		
相關人員	紀茂傑		
	梁伯翹		
	陶其取		

### 附錄三 期末審查會議紀錄與意見回覆

#### 壹、期末會議紀錄

召開本所 102 年度委託研究「鋼筋混凝土於中性化及氯離子複合作用下腐蝕劣化之研究」、「以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究」暨協同研究「取樣位置與萃取方式對鋼筋混凝土氯離子含量與檢測方法影響之研究」等 3 案期末審查會議紀錄

一、時間：102 年 11 月 5 日（星期二）上午 9 時 30 分

二、地點：本所簡報室

三、主持人：陳組長建忠

記錄：李台光、厲妮妮、林志彥

四、出席人員：如簽到單

五、簡報內容：略。

六、綜合討論意見：

#### （一）「鋼筋混凝土於中性化及氯離子複合作用下腐蝕劣化之研究」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

1. 本研究評估添加不同化學摻劑或礦物摻料，對鋼筋混凝土耐久性與腐蝕的效益，研究符合預期成果。

本研究之模擬溶液及鋼筋混凝土腐蝕評估試驗等，符合預期研究之目的與成果。

中華民國土木技師公會全國聯合會 蔡技師得時：

1. 期末報告書第 5 頁，研究目的第 4 及 5 點，建議於第 5 章再次強調。
2. 期末報告書第 29 頁及第 30 頁之圖 2.13 及圖 2.14，建議以彩色印刷。
3. 期末報告書第 67 頁之表 3.3，高爐石似欠列 50% 的資料。
4. 期末報告書第 89 至 93 頁，建議試體編號稍作說明。
5. 期末報告書第 92 頁之表 4.5，請補上強度單位。
6. 期末報告書第 97 頁之表 4.8，請補上碳化前（後）單位。

5. 期末報告書第 99 頁之表 4.10，請補上碳化前（後）單位。
6. 內容豐富，符合預期成果需求。

社團法人中華民國建築技術學會 宋技師永鑾：

1. 試驗結果顯示，氯化鈉 5% 時較 2.5% 之腐蝕率慢，是否如研究報告第 87 頁所示或為試驗誤差，請再確認。
2. 建議可增述降低混凝土中性化及氯離子的方案及增加混凝土抗腐蝕的策略。

蘇教授南：

1. 本計畫與其他 2 項計畫，在成果應用上有無關聯性，是否有互相引用及整合之可能性？
2. 簡報第 38 頁之結果，能否以 Pourbaux 圖表示？
3. 請針對目前校舍建築耐震評估與補強設計，老舊 RC 建築之碳化深度需為多少（例如 5cm）方為合理，略加討論。

詹教授穎雯：

1. 報告內容之實驗計畫，建議補充以下內容：試驗變數、材料變數、試體組數、養護齡期及試驗時間等，應有較詳細之敘述，以表列方式表示較佳。
2. 試驗結果之表示，應將試體齡期、試驗時間、試驗持續時間等不同的「時間」，加以明確區分標明。
3. 試體加速中性化之方法在第 3 章中，並無詳細說明。
4. 有關「中性化」與「氯離子」之複合作用，在報告中並無著墨，請補充。
5. 請將期中、期末審查意見的回覆，附於報告中。

廖組長肇昌：

1. 由本研究初步結果而言，建築物之硬固混凝土評估腐蝕情形，是否一併將 pH 值納入評估中性化，而非以氯離子含量，作為唯一判斷依據。
2. 本研究結果之齡期為短期，添加爐石粉及飛灰的混凝土有短期的結果，長期若有不同結果，宜加註在報告中。如此等試體在 60 或 90

天齡期，有不同的試驗結果，建議應持續觀測。

3. 添加飛灰及爐石粉發現會降低 pH 值，則在結構物腐蝕評估時，有添加飛灰及爐石粉的混凝土，以中性化做判斷依據是否妥適？

沈教授永年：

1. 本計畫探討中性化及氯離子複合作用下 RC 之腐蝕行為，成果符合預期目標，有助永續發展。
2. 請提供研究中所使用飛灰與爐石之材料基本性質與混凝土配比資料，以利研究報告的完整性。
3. 較低水膠比與配比設計方法之變數影響，值得繼續研究探討。

陳教授建謀：

1. 本研究結果豐碩，值得肯定。
2. 建議各項實驗結果可用迴歸分析，整理出一因果關係公式，可取得較具體量化的結論。
3. 建議將各種試驗情況與建築物實際面對的環境做一對應比較，使建築物管理者較容易理解研究成果，作為管理上參考。

陳組長建忠：

1. 成果請考量實例案例的應用分析，及設定情形下的量化效益與影響。

研究單位回應：

1. 試驗變數、材料變數、試體組數、養護齡期及試驗時間等，將會詳列於成果報告書中。

## 以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究

2. 漏列項目及單位之表格，將於成果報告書中補正。
3. 期中、期末審查意見之回覆與專家座談會紀錄，將附於成果報告書中。
4. 降低混凝土中性化及氯離子的方案及提高混凝土抗腐蝕策略，將於成果報告第 5 章補強。

### (二)「以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

1. 本研究符合預期成果。
2. 關於鋼筋混凝土表面存在被覆之狀況下，其鋼筋腐蝕行為及其量測，因國內建築物（內裝與外裝）使用磁磚比率非常高，且磁磚之規格、材質、吸水率相差甚多，建議應以目前國內使用比率高者作為實驗之優先選擇。

中華民國土木技師公會全國聯合會 蔡技師得時：

1. 建議第 6 章之結論內容能以呼應預期目標之方式撰寫。
2. 內容豐富，符合預期成果需求。

社團法人中華民國建築技術學會 宋技師永鑾：

1. 依本研究之實驗結果顯示，目前之 ASTM C876 腐蝕電位量測無法準確反應鋼筋腐蝕之位置與程度，此訊息可提供相關公會，做為進行鋼筋腐蝕鑑定之檢討。
2. 目前因鋼筋腐蝕而發生混凝土剝落之情形，多為 20 年以上之建築物，而當年並未有防腐蝕塗料。為求真實狀況，可考慮不塗防腐蝕塗料；又防腐蝕塗料之厚薄會影響實驗結果，宜多注意。
3. 按本研究之建議採用脈衝腐蝕量測法，但其計算腐蝕量與真實損失量之間差約 10 倍，是否偏高？

蘇教授南：

1. 依研究報告書第 6 章之第 5 點結論，計算腐蝕量與實際量測值差約 10 倍之多，是否有深入探討之必要？即針對其

影響因素及核心問題進行分析。

2. 依研究報告書第 45 頁提及水灰比為 0.4、0.5 與 0.6，但結論中並未對水灰比 0.4 之試驗結果分析，宜請補充或說明之。

詹教授穎雯：

1. 電化學相關量測技術有相當敏感度，並受許多因素影響。因此，儀器設備之條件、規格、校正等，與操作人員之瞭解及訓練，對於量測結果之正確性、可參考性有關鍵影響，故建議報告中在適當章節略作補充說明。
2. 請將期中、期末審查意見與回覆附於報告中。

廖組長肇昌：

1. 現地量測腐蝕速率，建議就同一量測標的，採不同時間間隔量測其隨時間之變化情形（例如每月量測 1 次，連續量測 1 年；或每 3 個月或 6 個月量 1 次）。
2. 就研究結果，建議律定各項條件下的誤差範圍。
3. 足尺寸樣品（RC 柱），在完成試驗量測後，建議進行鋼筋尺寸量測（單位重、節高、節距）及力學試驗（拉力 $f_y$ 、 $f_u$ ）及彎曲試驗）以瞭解腐蝕量與鋼筋品質是否有遞減關係。

沈教授永年：

1. 本研究探討腐蝕電流量測法與重量損失法，二者結果之差異。研究成果與預期目標符合，有助於提升評估 RC 結構物腐蝕速率之精準度。
2. 依研究結果指出，水灰比於 0.5 以上時，可以獲得合理之鋼筋腐蝕值。然而基於混凝土耐久性之考量，通常要求水灰（膠）比需小於 0.4（或 0.45）。故電化學法是否適用於低水灰比（低於 0.4）之 RC 結構物？

陳教授建謀：

1. 本研究成果豐碩，值得肯定。
2. 建議可考慮取一些不同年份之混凝土，量測其鋼筋劣化情形，作為管理上瞭解鋼筋混凝土隨時間腐蝕劣化之參考。

陶研究員兼主任其駿：

1. 針對鋼筋腐蝕速率之量測，其操作程序建議撰寫成 CNS 草案，附於報告附錄中呈現。
2. 對於腐蝕量計算之方法、或所觀察到之腐蝕現象，建議作扼要討論，提供外界參考；並建議採手冊型式，供技術人員依循。

陳組長建忠：

1. 成果請考量實例案例的應用分析，及設定情形下之量化效益與影響。

研究單位回應：

1. 本研究係採加速腐蝕試驗，故試體皆於每日量測一次。在自然狀態下，鋼筋由混凝土保護。若在鈍態下，通常腐蝕變化低，可根據需求改變量測頻率。
2. 不論小尺寸或大尺寸試體，於加速腐蝕試驗前後皆量測其鋼筋重量，故可據此推算重量損失。
3. 本研究的目的是未包括鋼筋混凝土經腐蝕後的力學性質改變，相關成果可參考 貴所 101 年計畫「梁主筋腐蝕位置對桿件韌性行為的影響」之研究報告。
4. 期末報告書將新增一節，統整所有試驗條件下預測值可能之誤差範圍。
5. 將於第 3 章進一步敘述儀器設備的規格、適用條件及使用人員可能需之訓練。
6. 期末報告書將併入期中與期末審查意見與回覆。
7. 使用防腐蝕塗漆的目的係為在加速試驗之下控制腐蝕區域，試驗時僅量測腐蝕段之腐蝕速率。
8. 目前試驗結果顯示，當水灰比 0.4 且保護層大於 6 公分時，量測值不穩定。推測該結果係受限於儀器性能，因混凝土阻抗大，脈衝電流不足以極化鋼筋。在現地情況下，若混凝土滿足以上條件

且不具明顯裂縫時，鋼筋應可得到良好保護，有害離子入侵時間長，不易發生腐蝕。

9. 本研究中，磁磚種類與尺寸的選定係參考期中專家座談會的建議。考量當前老舊建築較具鋼筋腐蝕量測與評估的需要，故優先選擇馬賽克磚與二丁掛磚。一般而言，磁磚的透水率較混凝土低，量測電流應多由灰縫處通過，故原預期量測值將受到灰縫密度的影響，但結果顯示貼覆馬賽克磚下亦不可得穩定量測值，故未來實務上還是以敲除表面貼覆再量測為宜。
10. 金屬腐蝕速率於鈍態及活性態下，其變化通常達數個數量級。本研究針對鋼筋混凝土中鋼筋的腐蝕量測，因混凝土本身的性質亦會影響量測，故 10 倍尚屬可接受的範圍。本研究的結果說明，即使計算值不同於實際重量損失，但兩者之間成正比，藉由某倍率關係即可合理預估實際重量損失。

(三)「取樣位置與萃取方式對鋼筋混凝土氯離子含量與檢測方法影響之研究」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

1. 本研究符合預期成果。
2. 本研究期末簡報結論指出，取樣作業應由經過訓練之人員執行，建議應明確說明其訓練課程及考試認證制度，以利執行取樣作業。

中華民國土木技師公會全國聯合會 蔡技師得時：

1. 本研究期末報告第 125 頁之研究結論與發現，建議第 1 點至第 4 點以量化方式表示。
2. 本研究期末報告中，建議將強度單位 psi 以  $\text{kgf/cm}^2$  表示。
3. 本研究內容豐富符合預期成果需求。

社團法人中華民國建築技術學會 宋技師永鑾：

1. 各國對硬固混凝土氯離子之檢測方式、取樣方式均不同，建議後續研究可進一步探討其標準。

2. 本研究建議後續研究，可提出硬固混凝土之試驗標準提供業界參考。

蘇教授南：

1. 本研究期末報告第 33 頁之混凝土配比變數設計，建議混凝土配比再予詳列各項材料（如水泥、粗粒料及細粒料等重量）。
2. 本研究以 ASTM C1152 測試，則對硬固混凝土中之已水化之氯離子是否可測得？請與酸溶法比較之。
3. 建議本研究成果可提供中華民國國家標準(CNS)作為參考或修改。

詹教授穎雯：

1. 本研究有具體成果，對未來混凝土取樣之執行有提升進步作用，建議貴所召開專家座談討論取樣方法之步驟，並據以提出手冊或中華民國國家標準(CNS)修訂建議。手冊部分可提送營建署發布，CNS 修訂建議則可提送經濟部標準檢驗局修訂相關標準。

廖組長肇昌：

1. 若外來氯離子（如海鹽）或氯離子自始即存在於混凝土（如海砂），兩者之取樣方式是否有較佳適用性（如採鑽心試體切割片狀磨法，或採直接鑽孔磨粉方式）？

沈教授永年：

1. 本研究探討取樣（位置、鑽心試體尺寸等）與萃取方式（CNS、ASTM）對 RC 氯離子含量之影響，研究成果符合預期目標，有助於提升國內檢測氯離子含量之標準與準確性。
2. 本研究成果提出硬固混凝土水溶法與酸溶法之關係式，及硬固混凝土氯離子檢測方法與標準手冊（草案），具有貢獻性與實用性。

陳教授建謀：

1. 本研究成果豐碩，值得肯定。
2. 建議可建立取樣的標準作業程序，做為成果推廣及實際取樣之參考。

陳組長建忠：

1. 成果請考量實例案例的應用分析，及設定情形下之量化效益與影響。

研究單位回應：

1. 有關海鹽類之外來氯離子量測，建議採用鑽心試體切割片狀磨法進行。
2. 成果報告將針對結論第 1 點至第 4 點進行量化說明；並增列單位  $\text{kgf/cm}^2$  表示欄；而材料配比設計中，將詳列各種材料。
3. 委員意見將於成果報告的結論與建議中陳述，並對實例案例之應用分析及效益影響納入內容。
4. 有關成果報告對手冊與標準修訂之建議，文字及內容將以嚴謹態度進行編修，並提供後續研究使用。

七、會議結論：

- (一) 請業務單位詳實記錄與會專家學者及出席代表意見，並請研究單位參採。
- (二) 本次會議 3 案期末報告，經審查結果原則通過。
- (三) 成果報告書請確實遵照契約書規定之格式撰寫，並注意文字圖表之智慧財產權，如有引述外部資料，請註明來源。結論與建議事項之內容，須考量其具體可行。
- (四) 請研究單位依契約書規定，完成報告書送所及辦理核銷結案事宜。

八、散會：中午 12 時 10 分。

貳、意見回覆對照表

<p>王總幹事榮吉</p>	<p>1. 本研究符合預期成果。</p> <p>2. 關於鋼筋混凝土表面存在被覆之狀況下，其鋼筋腐蝕行為及其量測，因國內建築物（內裝與外裝）使用磁磚比率非常高，且磁磚之規格、材質、吸水率相差甚多，建議應以目前國內使用比率高者作為實驗之優先選擇。</p>	<p>1. 感謝審查委員對本研究成果的肯定。</p> <p>1. 本研究中，磁磚種類與尺寸的選定係參考期中專家座談會的建議。考量當前老舊建築較具鋼筋腐蝕量測與評估的需要，故優先選擇馬賽克磚與二丁掛磚。</p>
<p>蔡技師得時</p>	<p>1. 建議第 6 章之結論內容能以呼應預期目標之方式撰寫。</p> <p>2. 內容豐富，符合預期成果需求。</p>	<p>1. 本研究將修正第六章內容以呼應預期目標。</p> <p>1. 感謝審查委員對本研究成果的肯定。</p>
<p>宋技師永鑾</p>	<p>1. 依本研究之實驗結果顯示，目前之 ASTM C876 腐蝕電位量測無法準確反應鋼筋腐蝕之位置與程度，此訊息可提供相關公會，做為進行鋼筋腐蝕鑑定之檢討。</p> <p>2. 目前因鋼筋腐蝕而發生混凝土剝落之情形，多為 20 年以上之建築物，而當年並未有防腐蝕塗料。為求真實狀況，可考慮不塗防腐蝕塗料；又防腐蝕塗料之厚薄會影響實驗結果，宜多注意。</p> <p>3. 按本研究之建議採用脈衝腐蝕量測法，但其計算腐蝕量與真實損失量之間差約 10 倍，是否偏高？</p>	<p>1. 本研究的成果報告將由所方提供相關單位參考，或上網供公眾查詢。</p> <p>1. 使用防腐蝕塗漆的目的係為了於加速試驗下控制腐蝕區域，試驗時僅量測腐蝕段的腐蝕速率。</p> <p>1. 金屬腐蝕速率於鈍態及活性態下，其變化通常達數個數量級。本研究針對鋼筋混凝土中鋼筋的腐蝕量測，因混凝土本身的性質亦會影響量測，故 10 倍尚屬可接受的範圍。本研究的結果說明，即使計算值不同於實際重量損失，但兩者之間成正比，藉由某倍率關係即可合理預估實際重量損失。</p>

<p>蘇教授南</p>	<p>1. 依研究報告書第 6 章之第 5 點結論，計算腐蝕量與實際量測值差約 10 倍之多，是否有深入探討之必要？即針對其影響因素及核心問題進行分析。</p>	<p>1. 如前所述，10 倍尚屬可接受的範圍，只要計算腐蝕量與重量損失兩者間呈係數關係，即可據此應用。造成此誤差的原因將於各節成果中討論，但有待後續基礎研究來驗證前述假設。</p>
	<p>2. 依研究報告書第 45 頁提及水灰比為 0.4、0.5 與 0.6，但結論中並未對水灰比 0.4 之試驗結果分析，宜請補充或說明之。</p>	<p>1. 目前的試驗結果顯示，當水灰比 0.4 且保護層大於 6 公分時，量測值不穩定。推測該結果係受限於儀器性能，因混凝土阻抗大，脈衝電流不足以極化鋼筋。</p>
<p>詹教授穎雯</p>	<p>1. 電化學相關量測技術有相當敏感度，並受許多因素影響。因此，儀器設備之條件、規格、校正等，與操作人員之瞭解及訓練，對於量測結果之正確性、可參考性有關鍵影響，故建議報告中在適當章節略作補充說明。</p>	<p>1. 期末報告書中將於第三章進一步敘述儀器設備的規格、適用條件及使用人員可能需要的訓練。</p>
	<p>2. 請將期中、期末審查意見與回覆附於報告中。</p>	<p>1. 期末報告書將併入期中與期末審查意見與回覆。</p>
<p>廖組長肇昌</p>	<p>1. 現地量測腐蝕速率，建議就同一量測標的，採不同時間間隔量測其隨時間之變化情形（例如每月量測 1 次，連續量測 1 年；或每 3 個月或 6 個月量 1 次）。</p>	<p>1. 本研究係採加速腐蝕試驗，故各試體皆於每日量測一次。在自然狀態下，鋼筋由混凝土保護。若在鈍態下，通常腐蝕變化低，可根據需求改變量測頻率。</p>
	<p>2. 就研究結果，建議律定各項條件下的誤差範圍。</p>	<p>1. 期末報告書中將新增一節，統整所有試驗條件下預測值可能的誤差範圍。</p>
	<p>3. 足尺寸樣品（RC 柱），在完成試驗量測後，建議進行鋼筋尺寸量測（單位重、節高、節距）及力學試驗（拉力<math>f_y</math>、<math>f_u</math>）及彎曲試驗）以瞭解腐蝕量與鋼筋品質是否有遞減關係。</p>	<p>1. 本研究的目的是未包括鋼筋混凝土經腐蝕後的力學性質改變，相關成果可參考內政部建築研究所 101 年計畫「梁主筋腐蝕位置對桿件韌性行為的影響」的研究報告書。</p>
	<p>4. 現地量測腐蝕速率，建議</p>	<p>1. 本研究係採加速腐蝕試驗，</p>

	就同一量測標的，採不同時間間隔量測其隨時間之變化情形（例如每月量測 1 次，連續量測 1 年；或每 3 個月或 6 個月量 1 次）。	故各試體皆於每日量測一次。在自然狀態下，鋼筋由混凝土保護。若在鈍態下，通常腐蝕變化低，可根據需求改變量測頻率。
沈教授永年	1. 本研究探討腐蝕電流量測法與重量損失法，二者結果之差異。研究成果與預期目標符合，有助於提升評估 RC 結構物腐蝕速率之精準度。	1. 感謝審查委員對本研究成果的肯定。
	2. 依研究結果指出，水灰比於 0.5 以上時，可以獲得合理之鋼筋腐蝕值。然而基於混凝土耐久性之考量，通常要求水灰（膠）比需小於 0.4（或 0.45）。故電化學法是否適用於低水灰比（低於 0.4）之 RC 結構物？	1. 如前述，本研究的試驗方法適用於水灰比 0.4 且保護層大於 6 公分且不具明顯裂縫的條件。在現地情況下，若混凝土滿足上述條件時，鋼筋應可得到良好保護，有害離子入侵時間長，不易發生腐蝕。
陳教授建謀	1. 本研究成果豐碩，值得肯定。	1. 感謝審查委員對本研究成果的肯定。
	2. 建議可考慮取一些不同年份之混凝土，量測其鋼筋劣化情形，作為管理上瞭解鋼筋混凝土隨時間腐蝕劣化之參考。	1. 此法有助於建立更完善的腐蝕預測模式，然而本研究目前著重於試驗法，故該建議可作為未來研究課題規劃的參考。
陶研究員兼主任其駿	1. 針對鋼筋腐蝕速率之量測，其操作程序建議撰寫成 CNS 草案，附於報告附錄中呈現。	1. 本研究將填寫 CNS 草案申請專屬表格，但填寫內容及申請過程中預期將與所方多次討論修改，故將於成果報告外另附草案申請檔案，後續將持續協助所方申請。
	2. 對於腐蝕量計算之方法、或所觀察到之腐蝕現象，建議作扼要討論，提供外界參考；並建議採手冊型式，供技術人員依循。	1. 本研究將於專節討論現地腐蝕量測的步驟，並於結果討論中加強描述腐蝕現象。未來可視成果再後續討論選擇適當的手冊型式及適用的對象與範圍。

<p>陳組長建忠</p>	<p>成果請考量實例案例的應用分析，及設定情形下之量化效益與影響。</p>	<p>即使如期末簡報所述，國外已有相當的案例，但經訪談數位土木技師及參考目前的耐震評估規範後，國內幾無量測鋼筋腐蝕速率的案例或用於後續評估根據。藉由所方近年的相關成果報告及 CNS 量測標準的新制訂，預期未來可促使國內工程界更重視腐蝕量測的技術與分析。由於效益評估牽涉到許多現地調查資料，非本研究原先設定的研究目標，故尚無法於本研究報告內容呈現，但此主題值得後續探討。</p>
--------------	---------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

參、期末審查簽到表

內政部建築研究所

召開本所 102 年度委託研究「鋼筋混凝土於中性化及氯離子複合作用下腐蝕劣化之研究」、「以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究」暨協同研究「取樣位置與萃取方式對鋼筋混凝土氯離子含量與檢測方法影響之研究」等 3 案期末審查會議簽到簿

時 間：102 年 11 月 5 日(星期二) 上午 9 時 30 分			
地 點：本所簡報室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)			
主 席：陳組長建忠		記 錄：馬妮妮等 3 人	
出席人員	簽 到 處	代 理 人	
		職 稱	簽 到 處
沈教授永年	沈永年		
陳教授建謀	陳建謀		
詹教授穎雯	詹穎雯		
廖組長肇昌	廖肇昌		
劉教授玉雯	(請假)		
蘇教授南	蘇南		
中華民國全國建築師公會	江文宗		
中華民國土木技師公會全國聯合會	蔡新		
台灣省建築材料商業同業公會聯合會	王榮吉		
社團法人中華民國建築技術學會	梁永強		
社團法人台灣混凝土學會			
黃教授然	黃 然		

[開 FC1020008433S]

陳教授君改	陳君改		
楊教授仲家	楊仲家	自	
國立臺灣海洋大學	高茂傑	謝紹恒 梁伯魁	李台光 鄭安
國立臺灣科技大學	吳清賢		
李研究員台光	李台光		
厲研究員妮妮	厲妮妮		
林研發替代役志彥	林志彥		
相關人員	陶基取		

[開 FC1020008433S]



## 參考書目

- [1] Mehta, P.K. (2001), "Reducing the environmental impact of concrete", *Concrete International* , p. 61-66.
- [2] Broomfield, J.P. (1997), *Corrosion of steel in concrete : understanding, investigation and repair*, E & FN Spon, London.
- [3] Bentz, D.P., Jensen, O.M., Coats, A.M., and Glasser, F.P. (2000), "Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials: I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes", *Cement and Concrete Research* , p. 943-952.
- [4] Malhotra, V.M. and Carette, G.G. (1982), "Silica fume: a pozzolan of new interest for use in some concretes", *Concrete Construction*, May, p. 445-446.
- [5] R.R. Hussain and T. (2011), Ishida, Enhanced electro-chemical corrosion model for reinforced concrete under severe coupled action of chloride and temperature. *Construction and Building Materials*, 25(3): p. 1305-1315.
- [6] 陳冠霖 (2007), “添加矽灰與飛灰對鋼筋混凝土腐蝕行為影響之研究” 碩士論文，國立臺灣海洋大學材料工程研究所，基隆市。
- [7] 柯賢文 (1995)，腐蝕及其防制，全華，台北市，pp. 21-75。
- [8] ASTM C876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [9] ASTM G59-97, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurement, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [10] Stern, M. (1958), "A method for determining corrosion rate from linear polarization data", *British Corrosion Journal*, p. 122-133.
- [11] 紀茂傑 (2002)，“混凝土耐久性影響因素及評估方法之研究”，博士論文，國立海洋大學河海工程所，基隆市，p. 20-22。
- [12] Ford, S.J., Shane, J.D., and Mason, T.O.(1998), "Assignment of features in impedance spectra of the cement-paste/steel system", *Cement and Concrete Research*, p. 1737-1751

- [13] Rodriguez, P. (1994), Ramirez, E., and Gonzalez, J.A., "Methods for studying corrosion in reinforced concrete", Magazine of Concrete Research , p. 81-90
- [14] Jones, D.A. (1996), Principles and prevention of corrosion, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- [15] 王鼎智 (2002), “氣離子在不同混凝土裂縫型式下之傳輸與對鋼筋腐蝕影響之研究”, 碩士論文, 國立成功大學土木工程所, 台南. p. 10-11.
- [16] Klinghoffer, O., "In situ monitoring of reinforcement corrosion by means of electrochemical methods", Nordic Concrete Research 95:1.
- [17] Germann Instruments A/S (2012), GalvaPluse GP-5000 Instruction and Maintenance Manual, Germann Instruments A/S, Copenhagen, Denmark.
- [18] 何明錦, 邱建國, 歐昱辰, 蔡立倫, 何家維. (2009), “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” 內政部建築研究所協同研究報告。
- [19] 何明錦, 歐昱辰, 邱建國, 陳君弢 (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” 內政部建築研究所協同研究報告。
- [20] 卓奕杉 (2012), “RC 梁鋼筋腐蝕之剪力行為評估與縱向鋼筋腐蝕之耐震行為” 碩士論文, 國立臺灣科技大學營建工程所, 台北市。
- [21] 林建宏, 陳君弢, 歐昱辰, 邱建國, 葉勁宏 (2012), “梁主筋腐蝕位置對桿件韌性行為的影響” 內政部建築研究所協同研究報告。
- [22] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (1993), “Concrete: Structure, Properties, and Materials”. Prentice Hall, New Jersey, pp. 153.
- [23] 中國土木水利工程學會 (2007), “混凝土工程設計規範與解說(土木 401-96)” 科技圖書公司, 台北市。
- [24] 黃然, 楊仲家, 張正忠 (1995), “腐蝕混凝土梁構件力學行為之研究” 碩士論文, 國立台灣海洋大學河海工程所, 基隆市。
- [25] 葉桎銘 (2011), “不同拌合條件及養護環境下砂漿試體內部氣離子擴散與鋼筋腐蝕之關係” 碩士論文, 國立台灣科技大學營建工程研究所, p. 27-29。

**以電化學法量測混凝土中鋼筋腐蝕劣化之研究**

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：陳君弢、李宏仁、吳靖賢、韋昀孜

出版年月：102年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-03-8806-0（平裝）

