

鋼筋混凝土結構鋅熔射陰極防蝕應用

羅俊雄 *¹、黃克志 ¹、翁榮洲 ¹、潘麗梅 ²

Zinc Metalizing for Galvanic Cathodic Protection of Reinforced Concrete

J. S. Luo *¹, K. C. Huang ¹, J. C. Oung ¹, Lisa Pan ²

摘 要

為解決鋼筋混凝土結構鋼筋腐蝕問題，陰極防蝕技術為一有效的防蝕工法，其方法有外加電流式與犧牲陽極式。鋅熔射在鋼筋混凝土結構陰極防蝕上的應用在國外已使用多年，但在國內尚無使用的經驗；為瞭解此工法施工的可行性與有效性，本研究在蘇澳港 13 號碼頭底板進行現場試驗評估。結果顯示，9 個月的試驗期間，斷電後鋼筋電位之退極化量符合 NACE International RP290-2000 規範之 100 mV 的標準；且混凝土受海水潑濺呈水飽和狀態時，鋼筋所需的退極化時間較長，斷電瞬間混凝土的 IR 降較不明顯。

關鍵詞：陰極防蝕；鋅熔射；鋼筋混凝土結構。

ABSTRACT

Cathodic protection (CP) has become an established method for the rehabilitation of reinforced concrete structures subject to chloride induced corrosion. Different types and configurations of both impressed current CP systems and sacrificial anodes are now available for different applications. A galvanic cathodic protection system using metallized zinc anodes was applied to the Su-Ao harbor, Taiwan to mitigate the corrosion of the steel reinforced wharf decks. The performance of the galvanic protection systems, following 9 months of monitoring, is encouraging. The galvanic protection current is around 9 mA/m², and the depolarization potential meets the National Association of Corrosion Engineers International (NACE) 100 mV criteria. It is apparent that longer periods of potential decay are required for water-saturated concrete.

Keywords : Cathodic protection; Metalized zinc anodes; Reinforced concrete.

-
1. 工業技術研究院工業材料研究所
Materials Research Lab., Industrial Technology Research Institute
 2. 東昇琳科技公司
Ton Shen Lin CO, LTD
- * 連絡作者(rolly@itri.org.tw)

1. 前言

港灣構造物使用的材料主要為鋼鐵材料(如碳鋼鋼板(管)樁)、鋼筋混凝土(reinforced concrete, RC)及其他相關材料,常年於海洋環境的侵襲下,鋼板(管)樁會產生腐蝕現象,造成構材斷面縮小、性質改變、整體結構變化,以致於最終強度損失,無法承擔外力作用;而鋼筋混凝土結構,因海水中或大氣中的氯離子入侵,促使鋼筋銹蝕劣化,造成混凝土膨脹裂開,表面剝落,強度降低,甚至破壞整個結構物。因此,瞭解鋼板(管)樁、鋼筋混凝土結構在海洋環境中的腐蝕行為並選擇有效的防蝕方法,以確保結構物之耐久與安全,有其重要與必要性。為解決鋼筋混凝土結構鋼筋腐蝕問題,陰極防蝕技術為一有效的防蝕工法;其方法為利用外加電流方式或犧牲陽極方式促使陽極放電,電流經混凝土介質傳導至鋼筋而使鋼筋極化,最終達到鋼筋受到保護的目的。鋅熔射在鋼筋混凝土結構陰極防蝕上的應用,在歐、美、日等國已使用多年,經驗指出,可有效抑制混凝土中鋼筋的腐蝕^[1]。由於國內目前尚無鋼筋混凝土結構採用此防蝕工法,為瞭解此工法施工之可行性、適用性與有效性,今以蘇澳港 13 號碼頭兩基樁間之底板進行犧牲陽極式陰極保護研究。

2. 鋼筋混凝土結構鋅熔射防蝕機理

鋅熔射在鋼筋混凝土結構防蝕上的應用為陰極保護,即以混凝土表面的熔射層為陽極,鋼筋為陰極,藉由陽極放電,電流經混凝土介質到達鋼筋表面,然後沿著鋼筋經導線回到陽極或電源,形成一電路迴路,促使鋼筋極化而被保護;保護的方式有外加電流式與犧牲陽極式,如圖 1 所示。外加電流式的陰極保護主要是利用一外部電源來提供鋅熔射層與鋼筋間的保護電流,而犧牲陽極式的陰極保護則是利用鋅熔射層與鋼筋間的電位差來進行陰極保護。由於混凝土介質在乾燥環境中的電阻較高,因此犧牲陽極式的陰極保護必需在溼度高(如海洋環境中之飛沫帶)或混凝土保護層較小的環境下,方易使鋼筋極化,發揮防蝕功效。

3. 蘇澳港13號碼頭熔射工程施工

3.1 工程位置

蘇澳港 13 號碼頭為 RC 樁棧橋式碼頭,民國 70 年完工,由於碼頭底板為預鑄鋼筋混凝土結構,常年處於潮濕的環境中(滿潮時底板與海水面間之距離約 1m),受到海水與氯鹽入侵,早已有鋼筋銹蝕、混凝土剝落的現象。為評估鋅熔射工法的有效性,今將試驗底板(面積 48 m²)劃分為二個區域,一個區域不作熔射處理,僅就鋼筋現狀進行混凝土修補,而另一區域則進行植筋、紮筋與鋅熔射施工等工作。試驗位置如圖 2 與圖 3 所示。

3.2 施工步驟

根據交通部運輸研究所於民國 90 年之「港灣構造物陰極防蝕準則草案訂定(鋼筋混凝土部份)」研究報告與 ANSI/ AWSC2.20-9X/C2.20-9XM^[2],施工步驟如下:

- (1) 鋼筋混凝土表面處理:將剝落混凝土敲除,並將銹蝕鋼筋噴砂除銹,露出金屬光澤;若鋼筋銹蝕情況嚴重,則予以切除。
- (2) 使用空氣槍將混凝土表面碎屑清除並以噴火槍驅除表面水氣。
- (3) 鋼筋電連通測試。
- (4) 混凝土修補披覆。
- (5) 植筋與紮筋。
- (6) 電極與導線連接:包括 Ag/AgCl 參考電極,鋅塊陽極與鋼筋導線之連接,配置如圖 4 所示。
- (7) 混凝土披覆,保護層厚度 7.5 cm。
- (8) 混凝土表面鋅熔射:使用材料為 99.9% 純鋅,以電弧方式熔射,熔射層厚度 400 μm。
- (9) 封孔:熔射後 4 小時內以水溶性無機鋅塗料封孔,厚度 25 μm。
- (10) 鋼筋電位測試箱安裝。

4. 蘇澳港 13 號碼頭熔射工程評估

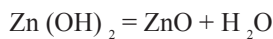
熔射施工後之防蝕效果評估分別於完工後 90 日、120 日、180 與 270 日進行。

4.1 工程位址目視檢查

為瞭解熔射施工後混凝土表面鋅熔射層是否有劣化或混凝土剝落的情形，防蝕保護 180 日後派遣潛水人員檢視施工位置，結果顯示，混凝土無剝落情形且鋅熔射層封孔塗層表面有白色物質存在。推論可能是因鋅進行陽極反應，以致鋅的腐蝕產物（鋅白）由封孔孔隙滲出；換句話說，鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，鋅的氧化需要氧氣與水份的存在以進行下列反應，



(鋅的初期腐蝕產物)



(若水份揮發，鋅的最終腐蝕產物)

而封孔塗料是採透氣性水溶性的無機鋅塗料，所以當陰極保護作用時，鋅陽極放電而其腐蝕產物會由封孔塗料的孔隙滲出。

4.2 鋼筋之電連通與鋼筋電位

為使陰極防蝕的保護電流均勻分佈到被保護結構物之鋼筋，鋼筋間的電連通性必需加以確認，即使用熔接鋼絲網或鐵絲搭接的鋼筋，只要電阻不超過 1 Ω ，即可保證導電性質良好。施工時既有鋼筋間的電阻值為 300 ~ 400 K Ω ，植筋與紮筋後鋼筋間的電阻值為 0.2 ~ 0.3 Ω ，新舊鋼筋間無電連通。即陰極防蝕的保護電流將均勻分佈至新植鋼筋的表面，並不會因電連通而傳導至已銹斷之鋼筋，造成保護電流設計不足情況。

鋼筋電位變化的情形如表 1 所示。表中符號 B# vs. R# 表示參考電極 R# 所在位置之鋼筋 B# 的電位，其中，R1 參考電極位於未作熔射（陰極保護）處理之區域，而 R2、R5 參考電極則位於鋅熔射保護區域。顯然的，混凝土表面未進行鋅熔射處理時混凝土內的鋼筋，其電位 (B1 vs. R1) 維持在 -190 ~ -160 mV (vs. Ag/AgCl) 之間，而在熔射陰極保護範圍內，各參考電極所在之鋼筋電位隨保護時間的增加而往正值方向移動，並趨於一定值。究其原因，是因鋅熔射陽極與鋼筋搭接進行陰極保護初期，鋼

筋（裸鋼）需要極化，以致鋅熔射陽極放電，造成鋼筋電位降低；隨著保護時間的增加，鋼筋極化已呈穩定狀態，保護電流僅需維持鋼筋之極化，故與極化之初相比較，鋼筋電位較正且趨於穩定狀態。

4.3 陰極防蝕效果評估

依據 NACE International RP290-2000^[3]，斷電後鋼筋電位之退極化量通常是判斷陰極保護的標準；即當陰極防蝕系統到達穩定保護電位時進行斷電，量測斷電瞬間與斷電 4 ~ 24 小時（或更長）後的電位，其差值必需在 100 mV 以上（即斷電後鋼筋電位去極化量 > 100 mV），方能確定陰極防蝕達到保護之效果。即

$$V_{\text{depole}} = |V_{\text{OFF, final}} - V_{\text{OFF, instant}}| > 100 \text{ mV}$$

上式中，

V_{depole} = 斷電後鋼筋電位之退極化量

$V_{\text{OFF, final}}$ = 瞬間斷電後最終的鋼筋電位（通長為瞬間斷電後 4 ~ 24 小時之鋼筋電位）

$V_{\text{OFF, instant}}$ = 瞬間斷電之鋼筋電位

圖 5 至圖 7 分別為不同暴露時間各參考電極 R1、R2、R5 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖。由於本研究是採犧牲陽極式陰極保護，故通電狀態是將鋅熔射陽極導線與鋼筋陰極導線在測試箱內以接線端子相連接，使陽極與陰極形成迴路而電連通，而斷電狀態是將測試箱內之陽極導線與陰極導線分離，造成斷電情況；量測時以電位記錄器記錄鋼筋電位，每秒記錄一次，連續記錄 8 個小時以上（其中，通電時間約 1 小時，斷電時間約 7 小時）。由於參考電極 R1 位於非熔射區，鋼筋電位不受陰極保護通斷電之影響，故量測時段內鋼筋的電位維持一定值，如圖 5 所示。圖 6 為參考電極 R2 量測所得之鋼筋電位，陰極保護時鋼筋的電位較負，瞬間斷電時電位急劇往正值方向移動，隨後漸趨於一穩定值；由於陰極保護通電時參考電極量測到的電位為鋼筋的極化電位與混凝土產生的 IR 降，所以斷電瞬間急劇上升的電位，是為混凝土產生的

IR 降，而瞬間斷電 0.1~1 秒後所量測到的電位，為扣除混凝土 IR 降影響之鋼筋極化電位（即 $V_{OFF, instant}$ ）。圖 7 為參考電極 R5 位置所得之鋼筋電位，在通斷電量測時間內，鋼筋之通電電位與斷電電位相近，以防蝕保護 270 日之鋼筋電位為例，鋼筋之通電電位為 -413 mV (vs. Ag/AgCl)，而斷電 6 小時後之電位為 -408 mV (vs. Ag/AgCl)；究其原因，是因 R5 所在位置的混凝土經常受海水潑濺而呈水飽和狀態 (wet saturated)，混凝土有電容效應產生，以致鋼筋所需退極化時間較長^[3]。

表 2 至表 5 分別為不同暴露時間各參考電所在位置鋼筋之通電電位、斷電電位、7 小時退極化後之電位、IR 降、鋼筋極化量以及保護電流密度之數據。在防蝕保護 90 日後，保護電流密度為 7.8 mA/m²，鋼筋極化量均未達 100 mV 之保護標準。防蝕保護 120 日後，保護電流密度為 16.7 mA/m²，R2 位置鋼筋極化量大於 100 mV，到達保護標準，但 R5 所在位置因混凝土呈水飽和狀態 (IR 降為 5 mV)，有電容效應產生，以致鋼筋極化量小於 100 mV；然而比較熔射與非熔射區域之鋼筋電位，R5 位置鋼筋之瞬間斷電為 -396 mV (vs. Ag/AgCl)，而 R1 位置之鋼筋電位 -164 mV (vs. Ag/AgCl)，顯示 R5 區域之鋼筋已呈陰極極化現象，雖然此區域極化量小於 100 mV，但仍有陰極保護效果。表 4 與表 5 分別為防蝕保護 180 日與 270 日後之結果，保護電流密度分別為 8.9 mA/m² 與 11.1 mA/m²，其中，鋼筋退極化量均與 120 日之數據相近，顯示陰極保護在 120 日時，鋼筋極化已達穩定狀態，且由於鋼筋之間的電連通性，混凝土表面鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，可有效降低鋼筋之腐蝕速率。

5. 結論

1. 針對鋼筋混凝土結構，鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護適用於濕度較高的環境，如海洋環境中的飛沫帶與潮汐帶；若大氣帶因濕度較低，混凝土電阻較大，鋅熔射層無法提供有效的保護電流；水中帶則因鋅熔射層消耗速率過快，無法進行長時間之陰極保護。此外，在潮汐帶水中部份，若能

配合鋅犧牲陽極塊的使用，陰極防蝕效果更佳。

2. 蘇澳港 13 號碼頭熔射工程陰極保護 270 日後，參考電極 R2 位置鋼筋的退極化量大於 100 mV，符合保護標準；而 R5 位置因混凝土呈水飽和狀態，以致鋼筋極化量小於 100 mV。然而 R5 位置鋼筋之瞬間斷電電位與斷電 7 小時後的電位相近，與無熔射 (R1 位置) 區域之鋼筋電位相比較，R5 區域的鋼筋已呈陰極極化現象。因此，混凝土表面鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，可有效降低鋼筋之腐蝕速率。
3. 在陰極保護的情況下，混凝土受海水潑濺呈水飽和狀態時會產生電容效應，以致鋼筋所需退極化的時間較長。

誌謝

本計畫感謝基隆港務局蘇澳港分局提供工程場地，東昇琳科技公司提供工程經費與現場施工，交通部運研所港灣技術研究中心陳桂清博士與饒正研究員之技術討論。

參考文獻

1. T. Call and T. Neal, "Virginia's Use of Metallized Bridge Structures", Steel Structures Painting Council (SSPC) International Conference, Dallas, TX, Nov. 9-16, 1995.
2. "Specification for Thermal Spraying Zinc Anodes on Steel Reinforced Concrete", ANSI/AWSC2.20-9X/C2.20-9XM, American Welding Society, Miami, FL, 1999.
3. "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", NACE Standard RP0290-2000, NACE international, Houston, TX, 2000.

收到日期：2003 年 7 月 9 日

修訂日期：2004 年 7 月 23 日

接受日期：2004 年 8 月 12 日

鋼筋混凝土結構鍍鋅熔射陰極防蝕應用

表 1. 鋼筋電位 (單位: mV vs. Ag/AgCl)。

Table 1. Potential of steel reinforcement (mV vs. Ag/AgCl)

| 陰極保護時間 | B1 vs. R1 | B2 vs. R2 | B5 vs. R5 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| Day 0 | -188 | -567 | -590 |
| Day 90 | -185 | -370 | -305 |
| Day 120 | -164 | -352 | -401 |
| Day 180 | -160 | -356 | -337 |
| Day 270 | -190 | -384 | -413 |

表 2. 陰極保護90日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量。

Table 2. Protection potential, instant off potential, final potential and depolarization potential at Day 90.

| 參考電極 | 通電電位 (mV) | 瞬間斷電電位 (mV) | 退極化後最終電位 (mV) (t = 7 小時) | IR 降(mV) | 極化量 =退極化後最終電位-瞬間斷電電位 |
|------|-----------|-------------|--------------------------|----------|----------------------|
| R1 | -185 | -185 | -185 | | |
| R2 | -370 | -340 | -256 | 30 | 84 |
| R5 | -305 | -303 | - | - | - |

註：電流密度= 7.8 mA/m²；連接安裝後90日量測，保護電流= 70mA，鋼筋總面積= 9m²

表 3. 陰極保護120日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量。

Table 3. Protection potential, instant off potential, final potential and depolarization potential at Day 120.

| 參考電極 | 通電電位 (mV) | 瞬間斷電電位 (mV) | 退極化後最終電位 (mV) (t = 7 小時) | IR 降(mV) | 極化量 =退極化後最終電位-瞬間斷電電位 |
|------|-----------|-------------|--------------------------|----------|----------------------|
| R1 | -164 | -164 | -164 | | |
| R2 | -352 | -309 | -136 | 43 | 173 |
| R5 | -401 | -396 | -389 | 5 | 7 |

註：電流密度= 16.7 mA/m²；連接安裝後120日量測，保護電流= 150mA，鋼筋總面積= 9m²

表 4. 陰極保護180日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量。

Table 4. Protection potential, instant off potential, final potential and depolarization potential at Day 180.

| 參考電極 | 通電電位 (mV) | 瞬間斷電電位 (mV) | 退極化後最終電位 (mV) (t = 7 小時) | IR 降(mV) | 極化量 =退極化後最終電位-瞬間斷電電位 |
|------|-----------|-------------|--------------------------|----------|----------------------|
| R1 | -160 | -160 | -160 | | |
| R2 | -356 | -314 | -139 | 42 | 175 |
| R5 | -337 | -335 | -321 | 2 | 14 |

註：電流密度= 8.9 mA/m²；安裝連接後180日量測，保護電流= 80mA，鋼筋總面積= 9m²

表 5. 陰極保護270日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量。

Table 5. Protection potential, instant off potential, final potential and depolarization potential at Day 270.

| 參考電極 | 通電電位 (mV) | 瞬間斷電電位 (mV) | 退極化後最終電位 (mV) (t = 7 小時) | IR 降(mV) | 極化量 =退極化後最終電位-瞬間斷電電位 |
|------|-----------|-------------|--------------------------|----------|----------------------|
| R1 | -190 | -190 | -190 | | |
| R2 | -384 | -365 | -195 | 19 | 170 |
| R5 | -413 | -411 | -408 | 2 | 5 |

註：電流密度= 11.1 mA/m²；安裝連接後270日量測，保護電流= 100mA，鋼筋總面積= 9m²

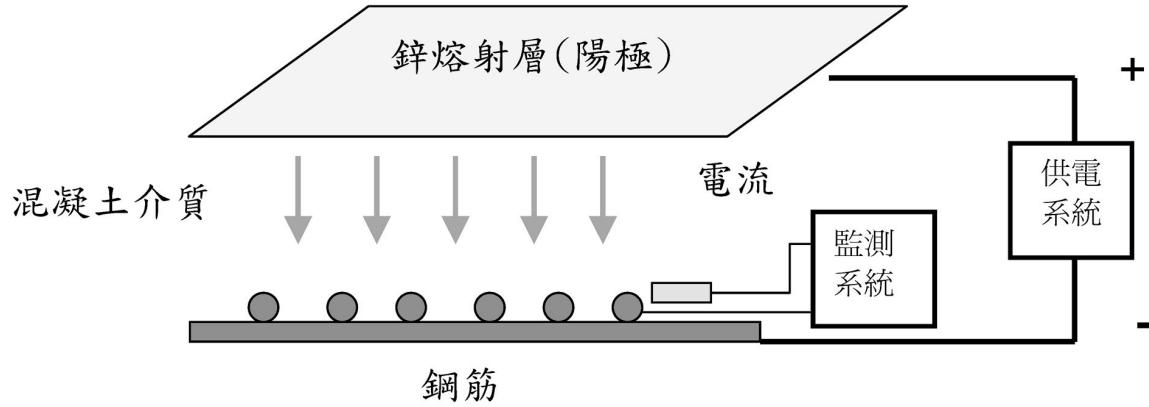


圖1. 鋼筋混凝土結構鍍鋅陰極保護。

Figure 1. Illustration of galvanic cathodic protection of RC structures using metallized zinc anode.

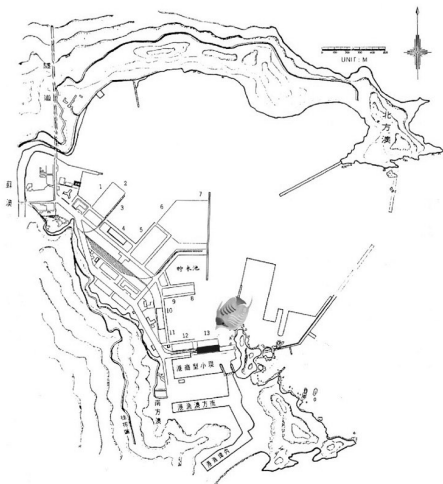


圖2. 蘇澳港13號碼頭平面位置圖。

Figure 2. Location of wharf #13 in Su-Ao Harbor.

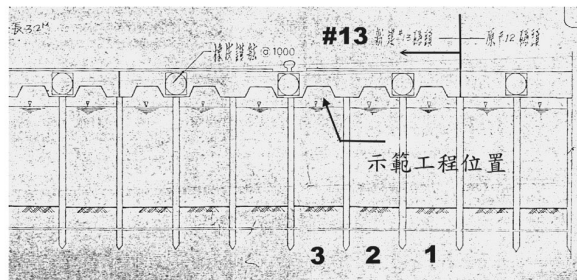


圖3. 蘇澳港13號碼頭鍍鋅工程位置圖。

Figure 3. Engineering work position of zinc anode.

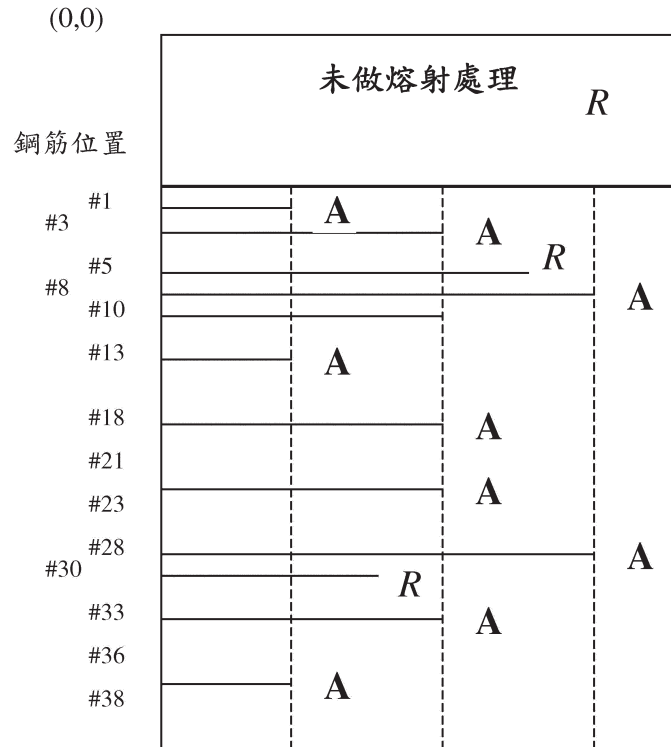


圖4. 電極安裝位置圖。
Figure 4. A schematic diagram of the locations of zinc ingots and reference electrodes.

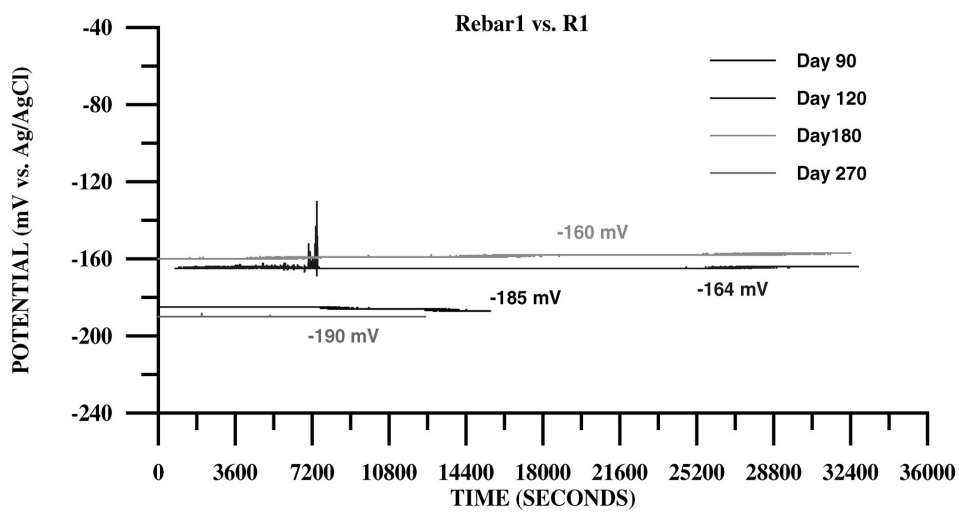


圖5. 參考電極R1所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖。
Figure 5. Polarization decay plots in the non-metallized R1 location at various exposure times.

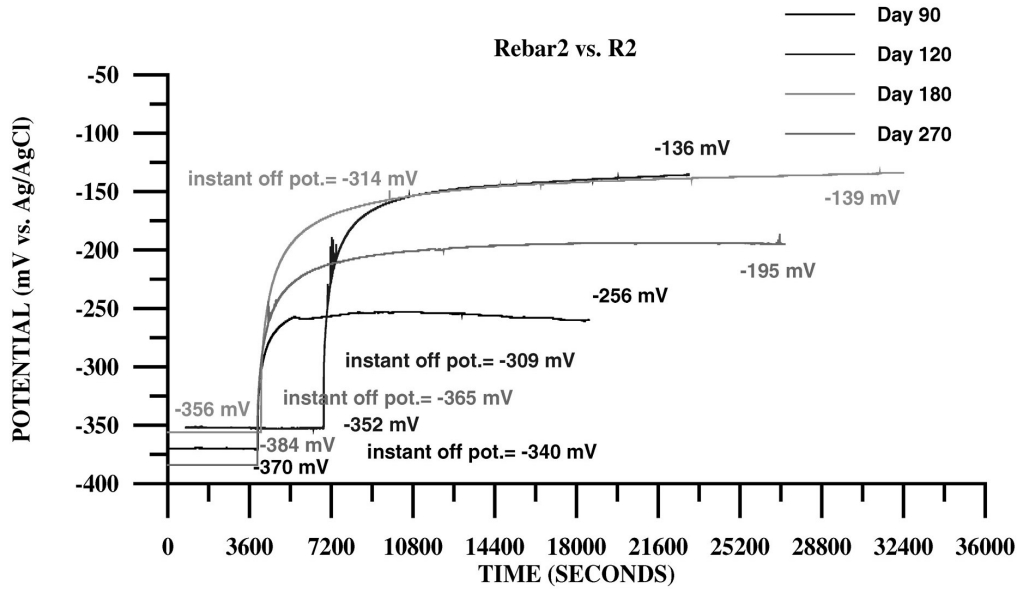


圖 6. 參考電極R2所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖。
Figure 6. Polarization decay plots in the metallized R2 location at various exposure times.

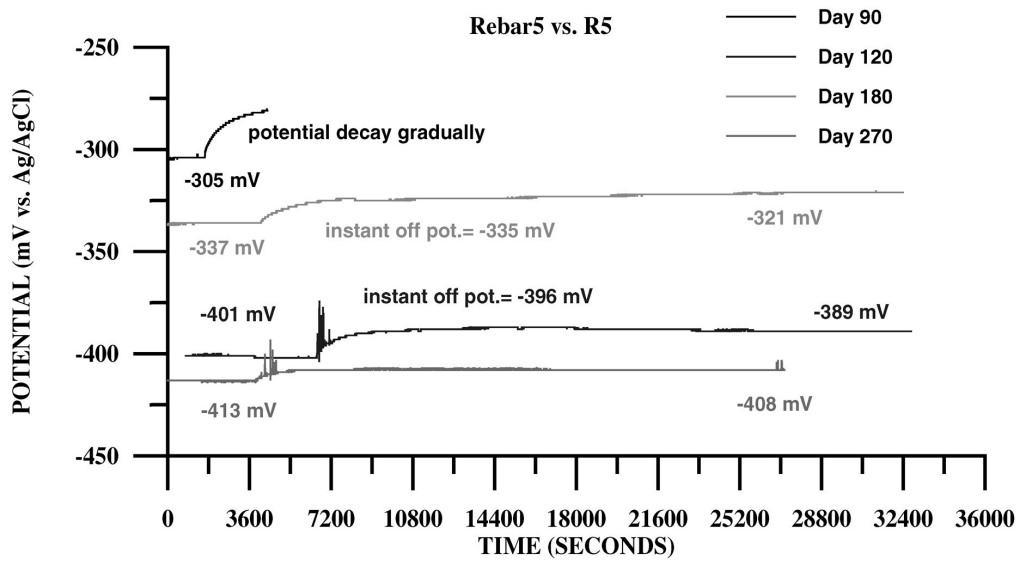


圖 7. 參考電極R5所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖。
Figure 7. Polarization decay plots in the metallized R5 location at various exposure times.