

# 「儲槽底板腐蝕與保護」

陳幸男

## 一、前言

在保護埋設於地面下的金屬構造物，以避免腐蝕、延長使用壽命、增加經濟價值等方面的作業，國內在近幾年來已有很大的進展——不只在觀念上予以吸收，而且在實務上也予以應用。尤其是在地下埋設的管線方面，無論是關於表面的處理、塗覆或施行陰極防蝕等保護措施，都實施得很普遍。即使是港口設備的基礎鋼樁，碼頭岸壁鋼樁等，也都有完善的保護作業程序，至於儲槽方面，當然也有很完善的保護措施——惜乎一般的注意力似僅集中於有關外壁的處理；內壁液界面的保護問題等。至於產生嚴重腐蝕問題的槽底板外表面，竟然都漠然以待！是因為尚未曾發生嚴重的洩漏事件，所以隱藏的嚴重問題尚不足以引起重視的緣故罷！

儲槽底板的外表，係直接的和基礎土壤接觸。相當於地下埋設的金屬管。除了具有因土壤環境所引致的一般腐蝕因素以外，還有些較為特殊的腐蝕因素存在。其中，有些因素尚待深入研究。

## 二、腐蝕因素概述

金屬體的腐蝕，無論是表面的氧化、內部晶粒結構的應力崩潰、酸、鹼等的化學侵蝕、或微生物引起的霉蝕等，致而在形態上呈現穿孔或層剝現象，歸根結底，皆可以

電化學反應的觀點來解釋。以下係儲槽底板，考慮其完成電化學反應要件，予以歸納出足可釀成嚴重腐蝕的幾項因素：

### L石墊層 (Sand Mat) 與土壤

儲槽基礎土壤所呈見的腐蝕性，係使底板外表產生嚴重腐蝕的主要原因。這種腐蝕性，和砂墊層、大地土壤本身所具有的腐蝕程度、基礎下方地下水的情形、水滲過大地表面的狀況等都有關係。

如前所述及，金屬在土壤中的腐蝕，係基於電化學反應。水，在這個反應中，扮演著電流傳導的主要媒介——電解質。當然，純水的導電性不良，不足輕重，但溶於水中的鹽類，却使「水」極性化，成為導電性良好的電解質，而在金屬腐蝕反應中扮演最重要媒介的角色。由這一項說明，不難瞭解，鋼鐵在土壤中要發生腐蝕現象需要水；至於產生的嚴重程度，就得考慮土壤中所含有物質特性上的差異。通常由於這種差異的存在，使鋼鐵金屬產生腐蝕的程度有 10~100 倍的變異。像這種具有複雜因素的腐蝕介質，要簡括的加以表明實在不容易。但是基於事實上的需要，總得找出一些可以說明腐蝕程度的概略指標——土壤電阻係數，通常就被用來做為假設的依據。

「土壤的電阻係數與鋼鐵的腐蝕性大略成反比」

上述的假設，係根據許多專家長期實施觀測、試驗所得到的結論。（詳附表一）

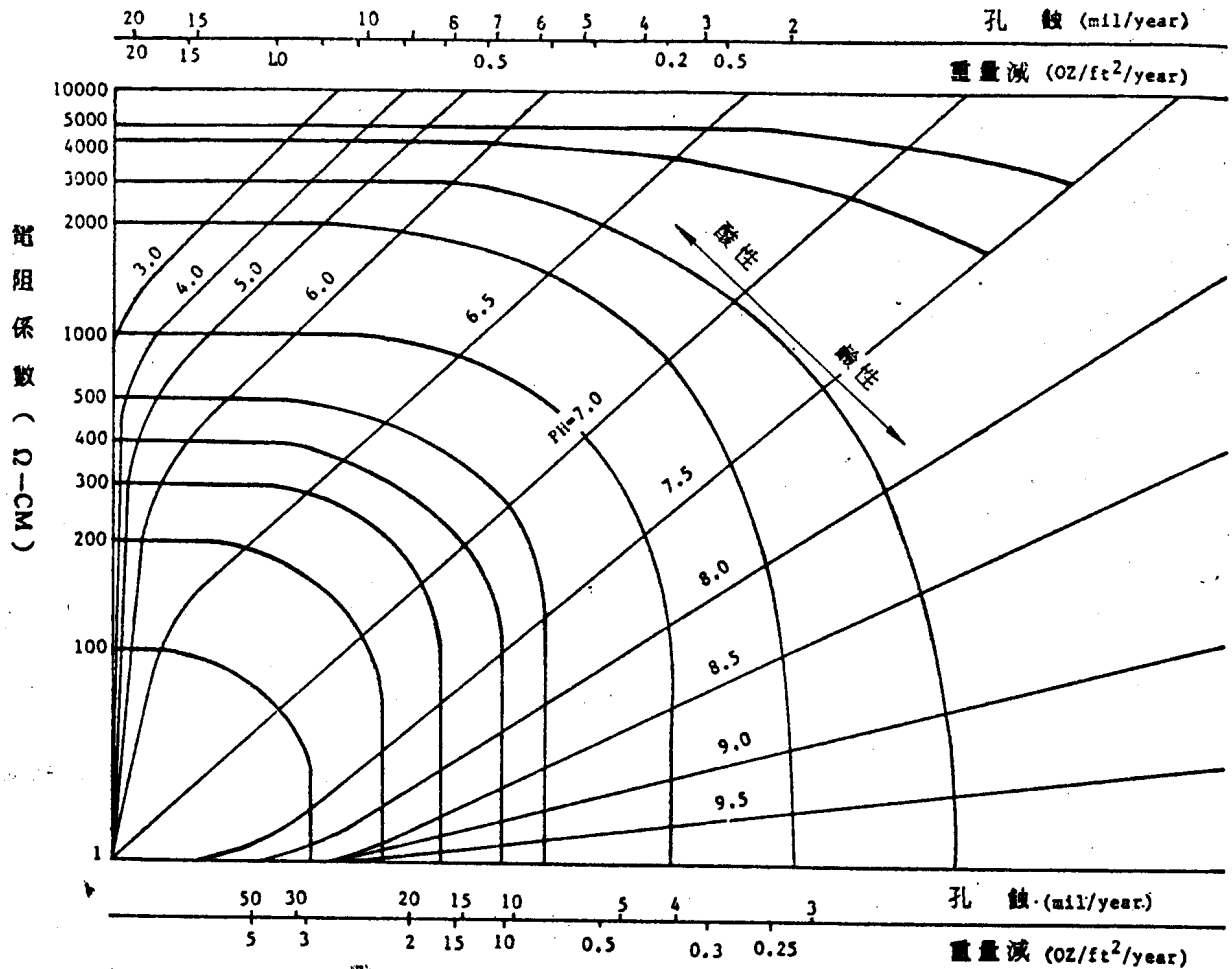
表一 土壤電阻係數 (Resistivity of Soil) 對裸露鋼管之腐蝕性

腐蝕程度	土 壤 電 阻 係 數 值 ( $\Omega\text{-cm}$ )				概略腐蝕率 mm/Yr
	(1) F. O. Waters	(2) L. M. Applegte	(3) V. A. Pritula	(4) E. R. Shepard	
極 激 烈	0~ 900	0~ 1,000	0~ 500	0~ 500	>0.125
激 烈	900~ 2,300	1,000~ 5,000	500~ 1,000	500~1,000	0.04 ~0.125
中 程 度	2,300~ 5,000	5,000~ 1,000	1,000~ 2,000	} 難以確定	0.01 ~0.04
小 程 度	5,000~10,000	$10^4\sim 10^5$	2,000~10,000		0.0025~0.01
不 明 顯	>10,000	> $10^5$	>10,000		<0.0025

通常，低電阻係數的土壤中，含水率較高，腐蝕介質如鹽、酸等溶存濃度也較大，而使腐蝕電流易於流通，而加速鋼鐵金屬的腐蝕。迄目前為止，雖然已經深切了解前述土壤電阻係數其鋼鐵腐蝕程度關係至深，但在實際的定量關係上，則尚難以遽下定論。

除了上述以土壤電阻係數為鋼鐵相對腐蝕程度判斷的

依據以外，酸鹼度也是一項很重要的資料。由電化學理論推演出來的Nurst氏方程式中，可以發見到土壤的酸鹼度影響到金屬在該環境下的氧化還原 (Redox-Potential) 電位。其與鋼鐵腐蝕程度的關係，較為具體的則為 R. F. Stratful 研究關於電阻係數、pH 值與腐蝕量的關係圖。(附圖一)



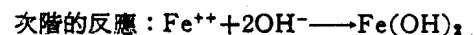
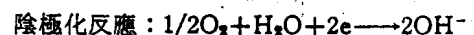
圖一 電阻係數 pH 值與腐蝕量的關係

如圖所示，土壤電阻係數在 3,000Ω-cm 以上時，鹼性對鋼鐵腐蝕程度的影響不太大。

通常，儲槽底板都有腐蝕的問題。尤其在本省西部地區。西台中部以北地區，地層結構複雜；西台中部以南，屬砂質壤土，其中含鹽分較多，土壤電阻係數偏低。而且，省內腹地狹小，四周臨海，各地點土壤的腐蝕性呈見出多樣性的變化。即使在同一地區，經過一段時間後也會有不同的腐蝕性質。當然，諸如地下水、海水、工業廢水等顆粒的沉澱物含有硫化氫、二氧化硫或溶於水中，可能引

起腐蝕物質等的滲透，也會形成不同程度的腐蝕性。

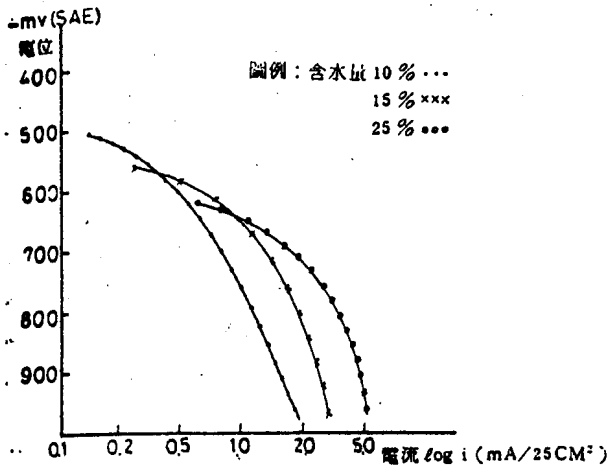
鋼鐵在土壤中，因化學作用產生的典型腐蝕過程通常係以下列的反應方程式表示：



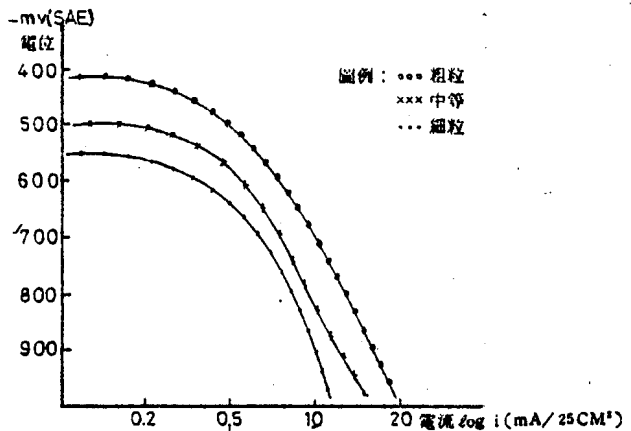
儲槽基礎使用砂墊層，因組成顆粒及含水率不同而呈見不同的電阻係數，下表 (表二) 及圖二為典型的情況。

表二 砂墊層的電阻係數例

砂 粒 度	氯 離 子 濃 度 (PPM)	酸 鹼 度	採 樣 時 含 水 率 (%)	不 同 含 水 率 的 電 阻 係 數 (Ω-M)			
				5%	10%	15%	20%
粗 砂	5	6.2	6.5	380	210	150	—
中 等 粒 度	4	6.8	6.8	150	230	100	70
細 砂	10	6.4	6.4	1,000	420	100	75



(a)鋼板在不同含水率砂中陰極化曲線圖



(b)鋼板在不同粒度砂中的陰極化曲線圖

圖 二

根據圖表分析，可獲得下述幾點印象：

△由於砂中含水率不同，電阻係數發生的變化，中等粒度的砂比粗砂大。

△相同含水率的砂，粒度愈細，腐蝕性愈強。

△含水率與腐蝕性變成正比關係。

△ $J = 1\text{mA}/25\text{cm}^2$  時，可使鋼鐵板達到 Pourbaix 圖中的「免疫區」，防止腐蝕。

以上幾點，雖然展示砂的一般腐蝕傾向，但是否即可列為自然界的一般通則，尚待證明。另有一點值得推測可能係因為承載物體，使基礎砂土黏合，以及由於毛細作用使地下水滲入的關係。

2.由於含氧濃淡電池作用產生的腐蝕

埋設於土壤中鋼鐵，由於本體組成成分不勻，或表面局部氧化而生銹，再加上環境因素，如含氧濃度、電解質濃度、微生物繁衍、或土壤含有金屬離子等影響，而呈現不均一的電位值。這種情況，在油槽地板的案例中，環境因素的效果，顯得更為特殊而明顯。

儲槽底板與其所接觸的基礎土壤，因具有不同的「氧氣」穿透性，而有不同的電位，即形成含氧濃淡電池 (Concentration Cell)。通常具有低程度氧氣穿透性的部份，電位較低，作用猶如陽極；其他部份相對的成為陰極。其間藉土壤為電解質電橋，底板本身為良導體，而構成一個小型的電池迴路，流通腐蝕電流，致使陽極化區的鋼鐵底板產生腐蝕。通常，這種濃淡電池作用產生的陽極區與陰極區間的電位差異不逾 100mV。

究竟儲槽底板的含氧濃淡電池實際情形如何？油槽底板的外緣區，實際上的氧氣穿透性高，中央部份，氧氣穿透性低；於是中央部份成為電位較低的陽極，有腐蝕電流通於中央及外緣部份，使中央部份加速腐蝕。而且，由於儲槽承載量多寡變化極大，會使底板產生垂直變位，也會影響到基礎的透氣性，使量測的電位差異有所變化。

又儲槽建成期間的久暫，也會使量測的電位值發生變化，其變化傾向則較為一致——時間愈久，電位愈高。表三為一個10,000公乘儲油槽各部份實測電位分布記錄。

表三 儲槽底板電位分布記錄 (基準電極：SCE) 單位：-mV

測量時間	位置											
	中心 ←						→ 外緣					
	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m
組立 6 個月後	530	580	610	525	650	510	540	430	440	480	460	440
組立 1 年後	430	400	330	480	490	400	420	340	340	390	380	370

依底板各部份電位差異、基礎土壤的電阻係數、以及底板陽極區面積，約略可以估計出腐蝕電流量及腐蝕量。

$$\Delta \text{腐蝕電流 } I_c = V/R$$

式中 V：形成濃淡電池的電位差

R：底板陽極區的接地阻抗，可略計為

$$\rho / \sqrt{2} \pi r$$

$\rho$ ：土壤電阻係數 ( $\Omega\text{-cm}$ )

r：陽極區半徑，通常以底板半徑計算。

$$\Delta \text{腐蝕量 } M = Z I_c t$$

式中 Z：金屬電化當量。鐵約為 1.042g/A·Hr 或 9.1g/mA·Yr

$I_c$ ：腐蝕電流量，A 或 mA

t：累積時間，Hr 或 Yr

### 3. 漂游電流腐蝕 (Stray Current)

直流電化鐵路，工廠動力系統的接地設施，其他直流動力設備，以及其他設備的陰極防蝕系統等，如在儲槽附近，則各該系統的回歸電流，會使儲槽的底板及接地系統遭受到干涉，產生腐蝕損害。

在實務上，判定導致電氣性干涉腐蝕的漂游電流是否存在，且導致儲槽底板腐蝕，可以間歇測量儲槽與大地間電位變化情況，及槽區大地電位分布的狀況來確定。

測定大地電位分布，通常可使用兩支相同的參考電極 (半電池) (基準電極) 及一具高輸入阻抗的微電壓錶，或記錄型電位計來進行。依之可確定干涉電流源所在及電流回歸處，並設法以「排流」設施或於兩者間跨接可調電阻的方式疏導漂游電流；或以陰極防蝕方式來保護底板。

通常，干涉所產生的電位變化，咸認為 ±20mV 以下可予以忽略。

### 4. 銅接地系統引致的腐蝕

以往，銅接地系統可能引起儲槽底板腐蝕的問題，一向被人忽略。儲油槽為了預防落雷及消除泵油進出時產生大量靜電電荷而引起閃火現象，引致危害，皆予以良好接地。以「良好接地」的定義言，亦因人而異。以日本為例，依 JIS-A4201 規定，接地系統的阻抗不大於 10 歐姆即可。但本地通常的要求，則常為 5 歐姆以下或更小。

無論要求的數字是那一個，為達到低阻抗的要求目標，一般電氣工作人員都使用銅製品的棒、板、網等來做為接地電極。以之做為接地系統，具有施工簡易，經濟有效且壽命長的優點。但是當考慮到銅、鐵兩種不同的金屬以大地土壤為導通電流的電解質形成一組腐蝕電池時，不免應將其效益重行衡量。

銅在土壤中的自然電位，約在 -300mV 左右 (S.C.E. 基準)。儲槽底板則在 -440 ~ -580mV 之間。兩者比較，銅接地系統成為陰極，儲槽底板成為陽極，腐蝕電流自底板外緣流向銅接地系統。此腐蝕電流的大小，依基礎土壤的電阻係數對前述兩種不同接觸表面的接地阻抗以及兩者間的電位差約略計出如下：

$$I_c = \frac{E_e - E_t}{R_e + R_t}$$

式中， $E_e$ ：銅接地系統的自然電位。

$E_t$ ：油槽的自然電位。

$R_e/R_t$ ：接地系統與油槽的接地阻抗。

例如，測得  $E_e = -300\text{mV}$ ， $E_t = -580\text{mV}$ ， $R_e = 1\Omega$ ， $R_t = 0.5\Omega$  則腐蝕電流  $I_c = -300 - (-580) / 0.5 + 1 \approx 187 \text{ (mA)}$  (實例詳附表四)

表四 儲槽底板及接地棒電位記錄

測點編號	底板電位 -mV	接地棒電位 -mV	底板與接地棒 短路電流	接地棒阻抗	土壤電阻係數
*1	500	240	18 mA	0.9Ω	4,760Ω-cm
2	500	270	18 mA	1.85Ω	3,500Ω-cm
3	510	280	18 mA	1.70Ω	3,780Ω-cm

\* 儲槽編號：P-13

容量：25,000KL

建槽年次：1964

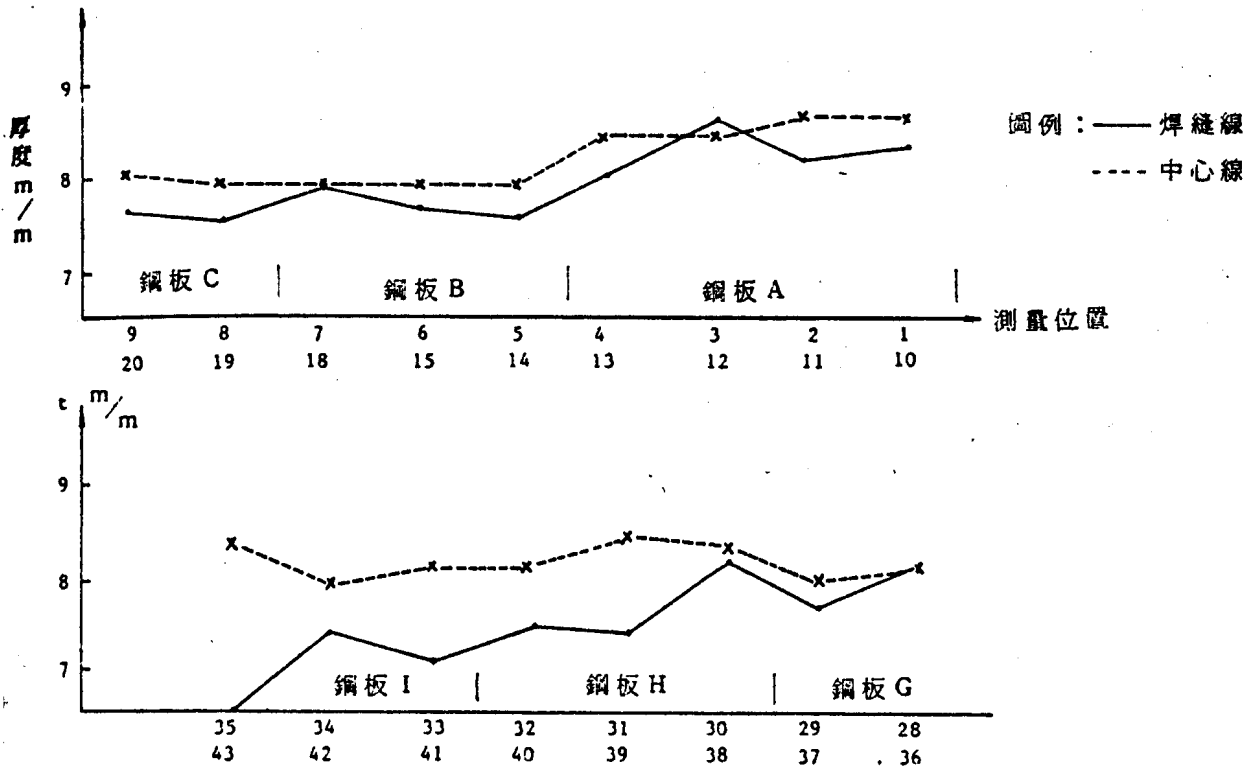
測量日期：1975

參考電極：SCE

### 5. 其他影響腐蝕的因素

儲槽若排水至鄰近土壤時，如未裝設專用排水系統，則由於土壤的滲透，也成為影響腐蝕的一個因素。此外，消防系統所使用的水源，如為海水時，也是一項不可忽視的腐蝕誘因。

儲槽底板敷設，係以一張一張的鋼板焊合，在焊縫部位及鄰近地區，由於電焊時的強熱作用，其組成分及內部晶粒結構發生了變化或殘留應力存在。所以該一部份就容易發生腐蝕現象。圖三係某一儲油槽於清洗時，實測底板各部份厚度後比較焊縫與鋼板中心線繪描的曲線。



圖三 鋼板焊縫及中心線厚度比較

又，埋藏於水泥中的補強鋼筋，通常比在土壤中的鋼鐵具有較高的電位這兩個不同的電位也構成了腐蝕電池。實際上，強鹼性的水泥，通常具有較高的電氣性阻抗，所產生的腐蝕電流應不致太過顯明。但是曾有一個實例：泵房基礎的補強鋼筋，因與儲油槽鋼板具有電氣性交連，結果是靠近泵房側的鋼板有腐蝕現象。

另外，亦曾有一案例；係儲油槽外緣使用磚砌為基礎亦導致與之接觸的儲油槽鋼板發生嚴重腐蝕現象。這種情況，或可以因為砌磚具有吸潮性，經常保持潮濕，並在此飽含水氣的情況下與底板接觸，所以引致腐蝕。

### 三、儲槽防蝕作業的尺度與方法：

管線與儲槽構築的歷史已經相當久，尤其儲槽比管線更為淵遠。目前，管線部份在防蝕作業上，大抵已建立了相當嚴謹而完備的程序與標準——自除銹、打底漆、塗覆包覆、以至於陰極防蝕系統等，一連貫的作業完整配合

，皆有所依據以一定的評定尺度的相關法令、規章來執行。反觀儲槽，在防蝕作業方面，一般的觀念，反而落在管線作業之後。主要的，可能係因為洩漏產生的危害事件殊難一見；加之項細繁複的腐蝕因素足以令人厭煩，竟至於有意的忽略緣故罷！

目前，儲槽底板的處理方式大抵如下：

- △底板塗佈柏油或煤焦底漆。
- △底板基礎最上層鋪砂，並於砂上噴洒一層重油。
- △底板塗佈柏油膏。
- △底板加厚，預留腐蝕裕度。

上述各種方法，皆不失為有效的防蝕方法。但是依據前述各有關腐蝕因素細加衡量，則顯有未臻盡善之感。以下幾種附加的防蝕作業，如能加以採用執行，當更完善：

- △接地系統改良
- △陰極防蝕系統採用及必要的絕緣處理。

這兩種作業，目前除了英國 BS-CP1021, §4.5 予以

列舉外，日本也初行立法執行。此外，各國尚無一致的步驟。以下簡略說明上述兩種作業的一般方法。

### 1. 儲槽接地系統改良

只要能確實防制儲槽與接地系統間所產生的腐蝕電流，即可消除底板腐蝕問題中的一個重要因素。

如果接地系統採用的電極，係化學活動性（金屬取次序）較鋼鐵為高的金屬，諸如鎂、鋁、鋅之類，代換常用的銅製電極，則靜電接地及停止腐蝕的雙重目標即可同時達到。

適宜這種目標的金屬，應具有價格廉宜，損耗性低，且損耗均勻，腐蝕生成物不影響接地阻抗等性質——鋅金屬，極合乎前述條件。

如採用鋼棒為心鐵，外包鑄鋅、成圓棒型，則不止現場施工簡易（可使用震動機直接壓入地下），而且在鋅材損耗後，做為心鐵的鋼棒仍為接地電極，對接地阻抗上升的影響極微。更可依必要長度，節節串接延長。

鋅接地電極，通常不附加充填劑，採逕自垂直埋設於地下的方式。其接地阻抗與使用壽命，依接地點土壤電阻係數而變化，可依一般接地阻抗計算式，如 \*Pope 氏及 \*Sunde 氏之計算式計算之。

註：

$$\text{Pope 氏計算式：} R_L = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{8L}{D} - 1 \right)$$

$$\text{Sunde 氏計算式：} R_{LN} = \frac{\rho}{2\pi LN} \left( \ln \frac{8L}{D} - 1 + \frac{2L}{S} \ln 0.656N \right)$$

### 2. 陰極防蝕系統的採行

如所週知，陰極防蝕系統，係抑制在電解質中可能產生的各種腐蝕電流，並使被保護體處於不活動性狀態而免於腐蝕，具卓顯成效的防蝕法。雖然在實用上分成流電陽極法 (Galvanic Method) 及外部電源法 (Impressed Current Method)，但在基本上，兩者的效益並無軒輊分別。僅是在使用上，因客觀的環境條件及主觀的經濟性而分別選用。

在採用陰極防蝕系統時，適當的設計作業有其必要性，其中以「保護電位」「干涉防制」及「基準電極預設」三項應特為注意。茲分述如下：

#### 2-1 有效的保護電位

新建的儲槽，若將犧牲陽極均勻的埋設在基礎土壤內，則只要估量的保護電流足夠，則底板整體的極化傾向一致，當可預期。至於舊儲槽，則由於無法將犧牲陽極裝置於底板下，只能環槽佈列，此時小型儲槽問題尚不嚴重，大型儲槽，則可能由於極化不均，或供電量不足致底中央

部位無法達到防蝕電位——又無有效可到達該點測量的基準電極存在，此時必需依估算方式來調整供電量。首先，估算儲槽底板的電位分布概況：

$$\text{*關係式 } V_s = -\frac{1}{2} \rho jr$$

式中， $V_s$ ：電流流經基礎土壤產生的電位降 (V)

$\rho$ ：基礎土壤的電阻係數 ( $\Omega\text{-M}$ )

$j$ ：保護電流密度 ( $\text{A}/\text{M}^2$ )

$r$ ：儲槽半徑 (M)

註：依歐姆定律  $V = IR_c$ .....(1)

$$\text{其中 } I = j \int_0^r dA \text{.....(3)}$$

$$R_c = \rho \cdot \int_0^{2r} \frac{dl}{dA} \text{.....(3)}$$

\*：自儲槽邊緣至中心，電流經過半個圓面積，儲槽與基礎土壤之接觸面則為全圓面積，故

$$\int_0^r dA \text{ 與 } \int_0^{2r} dA \text{ 之比值為 } 1/2$$

$$\text{結合式(1)(2)(3)可得 } V_s = -\frac{1}{2} \rho jr$$

如果基礎土壤中，靠近底板部份某一層次的電阻係數和一般數值有很大的差異時，產生的影響亦應予以考慮。例如，底板下方有一砂墊層，厚度 50cm 電阻係數 15,000  $\Omega\text{-cm}$ 。其下層土壤的電阻係數則為 2,000  $\Omega\text{-cm}$ ，則此時，自底板中心以迄邊緣，於通電後所產生的電位降則應以下式計算：

$$V = V_s + j\rho h$$

例如儲槽底板半徑 15M，流通的電流密度 2mA/m<sup>2</sup>

$$\text{則 } V = -\frac{1}{2} \times 20 \times 2 \times 10^{-3} \times 15$$

$$+ 2 \times 10^{-3} \times 150 \times 0.5$$

$$V = 0.3 + 0.15$$

$$V = 0.45 \text{ (Volts)}$$

此時，如果底板中心點要達到有效的保護電位 (-780 mV, SCE / -850 mV Cu/CuSO<sub>4</sub>)，則量測底板邊緣的電位，應為 -780 - 450 = -1,230 mV (SCE 基準)。

由上述的估計，設計者即明瞭，採用流電陽極法的陰極防蝕系統時，鋅、鋁系陽極不能適用（其開路電位僅在 -1,050 ~ -1,100 mV），僅可採用開路電位較高的鎂系陽極。或採用外部電源法，其開路電位可以隨機調整。

#### 2-2 干涉防制

在土壤電阻係數很高，或估計保護範圍使用流電陽極法在技術上有困難，或基於其他因素，就考慮採用外部電

源法。此時，埋設犧牲陽極的位置，應慎重考慮。通常係採用對稱方式，距離儲槽約一個直徑的地點為宜。如果位置不當，對附近其他埋設管線——諸如儲槽進出管線，儲運系統管線、消防水管等，將發生不良的干涉作用，加速其他設備的腐蝕。曾有一個案例，使地下消防水管於埋設未逾六個月而連續發生兩次腐蝕漏水事件。

使用外部電源法時，因直流供電系統驅動電位較高，在保護體與非保護體間，為預防保護電流洩漏而裝設的絕緣設施，如管線上的絕緣法蘭常因靜電累積，或管線意外的截斷而發生火花，形成危險現象。為消除此現象，可於絕緣設施的兩側裝設鋅地電池 (Zinc Groud Cell) 或裝設高功率低阻抗的電阻器。

### 2-3 基準電極預設

儲槽組立完成後，底板各部份的極化傾向，除非予以切割否則無法量測；除非發見洩漏，否則無法瞭解腐蝕程度。為了在儲槽操作使用期間隨時瞭解底板在腐蝕方面產生的各種動態，監視發生腐蝕的程度，以便判斷可能的後果，應該在新建槽時，即在底板下方的基礎土壤內，埋設可供日後做為量測比較的基準電極。

關於埋設的數量位置，當然是多多益善。但鑑於實際

作業的可能性及實用性，依 BS-CP1021 建議，只要不少於三組即可。

至於用什麼做為基準電極，原則上並無限制。目前，有使用半永久性飽和硫酸銅半電池者，亦有使用 ASTM-B418-Type I/II 鋅電極者。無論是那一種，原則上只要具有下列條件的材料均可使用：

- △使用壽命長
- △電位均一不變
- △按裝簡易
- △對儲槽底板不產生壞影響。

### 參考資料：

1. Fumio Yanase "Report on corrosion survey of bottom plate of oil tank".
2. BS Code "CP1021".
3. Fuzio Yamamuro "Corrosion & protection of oil storage tank Bottom surface."
4. 寬建彥「地下埋設管的電氣防蝕」  
作者：任職工量企業公司經理。