

## 地下輸氣管線之破損原因調查及改善

王瑞坤\*、黃克志

### Inspections and Improvements of Underground Gas Pipeline

R.C.Wang\* and K.C.Huang

#### 摘 要

新竹地區一條 12 吋天然氣管線，發生瓦斯洩漏造成很大的損失。管線開挖後發現一處如姆指大小，表面平滑光亮的蝕孔。本管線雖然有防蝕包覆及陰極防蝕保護，但仍發生管線腐蝕洩漏；因此確定目前的管線安全維護上仍有一些盲點。因此業主委託進行破損原因調查，並針對本管線進行全面的管線緊密電位量測及防蝕系統分析，以找出其他可能腐蝕區域及迷失電流干擾區進行維修。本研究報告主要分成三部份：第一部份破損原因分析：經分析結果確定管線遭電蝕干擾。第二部份防蝕現況調查：發現原有防蝕系統有些缺失，並且有幾處雜散電流干擾。第三部份為改善規劃及改善前後比較：依據調查結果提出對策進行改善，改善後防蝕效果明顯提昇。

關鍵詞：地下管線腐蝕；雜散電流；緊密電位測量。

#### ABSTRACT

Leakage occurred from a 12-inch gas pipeline in Hsinchu Region. A thumb size of localized corrosion was found after inspections. The outlook of the corrosion position is smooth and shining. According to original designs, the pipeline has coating wrap and cathodic protection system. However, leakage from corrosion still took place. Hence, some blind spots or unknown reasons exist during maintenance stage. To understand the damaged reasons, close internal survey, coating wrap inspections, and cathodic protection system evaluation were performed to investigate stray current interference. The present paper includes (1) analyses of damaged reasons, (2) improvements of anti-corrosion system, and (3) a comparison before and after improvements.

Keywords: underground pipeline corrosion; stray current; close internal potential survey (CIPS).

## 一、前言

新竹地區一條 12 吋天然氣管線，發生瓦斯洩漏造成很大的損失。管線開挖後發現一處如拇指大小，表面平滑光亮的蝕孔。此條管線雖然有防蝕包覆及陰極防蝕保護，但仍發生管線腐蝕洩漏；由此可確定目前的管線安全維護上仍有一些盲點。因此業主委託進行管線破損原因調查，並針對本管線進行全面的管線緊密電位量測及防蝕系統分析，以找出其他可能已發生腐蝕及迷失電流干擾區域，然後進行維修以確保管線的操作安全。本研究報告主要分成三部份：第一部份破損原因分析。第二部份防蝕現況調查。第三部份為改善規劃及改善前後比較。

## 二. 管線破損分析

1. 樣品材質：根據提供之資料，此鋼管材質規格應為 API 5L Gr. X52<sup>[1,2]</sup>。
2. 分析取樣：從送檢之樣品切取管線穿孔處之截斷面，製成試片 A 進行金相檢查及機械破壞顯微觀察。另取送檢之樣品切取管線（10cm×10cm）試片 B，進行電蝕加速試驗。
3. 檢驗分析結果
  - (1) 外觀分析：瓦斯管線破損位置為 12 點鐘方向（見圖1 及圖2），管線破損形狀約直徑 2cm，近似碗狀之凹洞；破損處表面非常光滑，呈現金屬光澤無任何腐蝕生成物殘留表面。
  - (2) 金相顯微觀察：A 試片依循標準金相準備程序進行鑲埋、研磨與拋光，以 2% Nital 浸蝕溶液（化學組成為  $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ）侵蝕出截面微觀金相組織，鋼管底材為肥粒鐵相（ferrite）和波來鐵相（pearlite）組織（見圖 3）。管線破損斷面無任何沿晶或穿晶破裂之痕跡，亦無任何機械加工之痕跡。
  - (3) 土壤腐蝕性檢測分析：由於破損管線已修護且開挖部分已回填，無法確實取得管線旁之

土壤分析，因此僅能取同一地區之其他土壤分析。依然能代表此區域土壤之腐蝕性，分析結果如表 1 所示，顯示此處土壤腐蝕性低<sup>[3]</sup>。

- (4) 由於管線原來之破損位置已經修護且回填，因此無法由現場偵測到電蝕干擾源，因此只能以實驗的方法，模擬管線遭電蝕時，其所產生的腐蝕型態與實際破損管線腐蝕型態的比較，來證明管線確實遭受電蝕干擾。
- (5) 電解腐蝕試驗<sup>[4]</sup>：預先將試片 B 之 PE 包覆破壞約 2cm 直徑之圓狀缺陷，將試片置於電解質環境中，再以 5AH（安培·小時）之電量由試片放出進行電解腐蝕試驗，試驗結果試片腐蝕型態（見圖 4）與實際破損管線腐蝕型態非常類似。

## 三. 陰極防蝕系統現況分析：

1. 測試點自然電位分析：要了解整個區域之陰極防蝕保護狀況，就必須了解管線之自然電位，各測試點自然電位分析結果如表 2 及表 3。
2. 整流站功能分析：要了解整個陰極防蝕系統功能，除了要了解管線電位分佈，另外還要了解所有的整流站輸出狀況及其它功能，才能有效的調配能量，使所有的管線能達到足夠而且均衡的保護，整流站功能分析結果如表 4。目前總輸出電流量為 0.86 安培，大部分管線皆已達保護標準，而系統最大可輸出總電流量為 7 安培，若考慮安全裕度，尚可提供 6.14 安培之保護電流，足夠使所有管線達陰極防蝕保護標準  $E_p < -850 \text{ mV}$  (Cu/CuSO<sub>4</sub>)。
3. 整流器輸出電流波形分析：原來整流器輸出之電流經示波器分析結果（見圖 8），屬於全波整流但未濾波又有電位浮動之現象，因此實際是另一種交流電的形式，對管線可能造成傷害。經利用電容濾波改善後，電流經示波器分析結果（見圖 9），可明顯的發現為一穩定的直流電。

4. 緊密電位測量：針對本管線進行全面的管線定位及緊密電位量測，找出可能腐蝕區域進行維修，並針對現有陰極防蝕系統，調查防蝕功能不足之處及找出迷失電流干擾區，全區緊密電位圖見圖 7。
5. 迷失電流分析：沿著管線每隔一至三公尺量測一次管線的管對地電位，再將測量所得電位對距離作圖，從圖上電位激烈變化處之變化情形可判斷出該處是屬於塗裝缺陷、外來金屬接觸，或是迷失電流干擾。緊密電位（電位-距離關係圖）主要功能是定位雜散電流進、出管線處。
  - (1) DC 電流干擾:目前發現有一處，位置在測試點 1095~1180（見圖 7）之間，干擾來源可能為中油整流站,經過兩次複查，確定為穩定態之 DC 電流干擾，改善規劃將提出有效的排流措施。
  - (2) AC 電流干擾:目前發現有二處，即 ×× 電廠周圍，及科學園區崗哨旁，此異常為 AC 電流干擾，由於交流型迷失電流是由於高壓交流電所形成，一般的防治法是利用犧牲陽極分佈於高壓交流電系統附近的結構物以保護之。
3. 原來整流器輸出之電流，屬於全波整流但未濾波又有電位浮動之現象，實際是一種交流電的形式，對管線可能造成傷害。整流器濾波電路，可利用電容濾波改善（見圖 10）。
4. 以現有之陰極防蝕能力，應可滿足目前地下管線陰極防蝕所需之電流。以往陰極防蝕系統所採用的防蝕標準，通電電位負於  $-850\text{mV}$  ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) 為 1992 年以前之舊標準<sup>[1]</sup>，1992 年以後之新標準<sup>[2]</sup> 應以極化電位  $-850\text{ mV}$  ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) 為準，雖然目前管線都符合舊標準，但若要使所有管線達到新標準，則建議增加所有整流站電流輸出電流，使所有管線通電電位（依照目前電位量測方式不變），保持電位在  $-2500\text{mV}$  ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) 至  $-2000\text{mV}$  ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) 之間。
5. 此管線由緊密電位調查結果尚有四處電位異常，建議能開挖就開挖檢修，不能開挖則以犧牲陽極法加強陰極防蝕。
6. 由表 3 之 T6 測點 V1 與 V2 比較，可發現鎂陽極確實可有效改善管線 AC 電位，因此建議有 AC 干擾的區域可依照圖 10 的方法，埋設鎂陽極改善 AC 干擾。

#### 四. 改善規劃：

1. 在位置在緊密電位測試點 1095~1180（見圖 7）之間有干擾現象，此段區域有許多管線在此會合，而有明顯的干擾來源為中油整流站。管線遭迷失電流干擾區域能開挖維修則開挖，不能開挖則必須加強陰極防蝕保護及排流，管線有開挖處可增加 17 磅鎂陽極四支，但鎂陽極與管線間必須串聯一組二極體，限制電流只能從鎂陽極流出，不能從鎂陽極流入（見圖 11）。
2. 關於穩定 DC 雜散電流干擾，治本的方法是會同干擾源之管線單位，做一次徹底整合把相互干擾的問題解決。治標的方法是再加強本身陰極防蝕能力及排流。

#### 五. 結果與討論

1. 一般管線發生在 12 點鐘方向之破損，較常發生的原因多為機械、應力破壞為主，若為腐蝕破壞則以電蝕為主。
2. 電蝕：當有電流經由管線表面流向土壤時，鋼管表面就會發生電解作用 ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$ ) 稱為電蝕，而其腐蝕速率與所流出管線之電流密度成正比，如果流出之位置發生在局部區域時，其孔蝕速度將加快進行。一般而言電蝕類似電解拋光作用，如果雜散電流連續性的流出腐蝕區域，則腐蝕區域無腐蝕生成物覆蓋而呈現金屬光澤。從破損管線之破損型態發現與電蝕型態比較符合。
3. 從破損管線之金相分析結果發現，鋼管底材與破損邊緣之材質皆為肥粒鐵相 ( ferrite ) 和波來鐵相

(pearlite) 組織, 晶粒大小也未改變(見圖4)。同時管線破損斷面無任何沿晶或穿晶破裂之痕跡, 亦無任何機械加工之痕跡。因此可以排除機械破壞之可能性。但對於剛開始管線PE 包覆的破損則不排除機械破壞或製造缺陷。

4. 破損管線處之土壤腐蝕性分析結果屬低腐蝕性區, 根據文獻資料(NBS) 長期埋設試驗結果, 一般鋼鐵在土壤中之平均腐蝕速率約 0.021mm/y, 最大孔蝕深度為 0.14mm/y。若以最大孔蝕深度計算, 本管線埋設時間約三年, 腐蝕深度應該不超過 0.5mm, 可是目前確定發生腐蝕穿孔 (> 8mm), 明顯超過正常值太大, 會發生此現象唯有電蝕才可能發生。由實驗室模擬電流腐蝕, 試驗結果型態與破損管線非常相似, 由此更可證明本管線遭受電流腐蝕干擾。

5. 造成電蝕可能原因:

- (1) 漏電: 所謂漏電是指管線本系統中之電力設備『故障』所造成的; 或是其他電力設備不當以本管線當成接地所造成的。洩漏電流所產生的腐蝕速率非常快。
- (2) 迷失電流干擾: 分為直流電及交流電兩種, 來源通常是外來的電場, 如: 電氣鐵路軌道洩漏電流、變電所、直流發電機及附近之陰極防蝕系統。陰極防蝕系統陽極地床位置設計不當, 防蝕電流自陽極流出, 進入本管線經管線後, 再流入原先欲保護之管線系統。
- (3) 高電壓感應干擾: 高電壓感應干擾一般有兩種效應, 一為靜電感應, 另一為電磁感應。靜電感應作用於包覆良好但有缺陷之管線, 當電荷累積至足以破壞"包覆缺陷"時瞬間放電。電磁感應則作用於平行高壓線之管線, 電荷累積於管線之"節點區"附近, 節點區之管線若有包覆缺陷時, 此缺陷處就會發生電蝕。所謂的"節點區"是指管線與高壓電平行, 但當出現管線或高壓線忽然轉彎相互遠離時。

6. 緊密電位測量發現有四處電位異常, 其中三處進

行開挖檢查。開挖結果有一處異常點與其他管線交叉埋設干擾(見圖5); 其他兩處則管線被鋼筋水泥包覆(見圖6), 顯示緊密電位測量確實可準確標示出管線潛在的問題。

7. 從表五中, 四處排流點其總排除 AC 電流量為 498mA, 假設 AC 電流腐蝕率為 DC 電流腐蝕率的 5%, 則管線每年將有 0.2kg 的腐蝕量, 如果腐蝕量集中在局部區域, 則每年都將發生腐蝕穿孔。
8. 從改善前後防蝕效果比較結果, 明顯可發現 DC 電位往陰極極化, 防蝕效果較以往佳; 而 AC 電位降低, AC 雜散電流獲得改善。

## 六. 結論

地下管線種類繁多, 包括油管、氣管、水管、及電管。而這些管線又有些有防蝕包覆有些沒有, 埋設的方式又交錯複雜。由於管線埋設於地下, 長期受到周圍土壤環境、輸送物質或外力的影響, 管線材質逐漸腐蝕劣化, 當腐蝕達到一定的程度, 就會發生破損導致輸送物質的洩漏, 嚴重時將導致工廠停工, 甚至環境的污染與生命安全的危險, 因此管線的保固是每個工廠最基本的課題。而良好的管線施工品質及完善的防蝕措施是地下管線保固最重要的條件。希望本文提供一些正確的管線防蝕經驗及觀念, 有助於國內防蝕工程技術的提昇。

## 七. 參考資料

1. NACE Standard 0169-83 "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Matallic Piping System", NACE International, Houston, TX, 1983.
2. NACE Standard 0169-92 "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Matallic Piping System", NACE International, Houston,

TX, 1992.

3. 日本學術振興學彙編，金屬防蝕技術便覽，日刊工業新聞社。
4. 電蝕、土壤腐蝕手冊，日本電氣學會、電蝕防止委員會編著。

表3. 各測試點 AC 電位 (Cu/CuSO<sub>4</sub>) 分析結果

Table 3. AC potential of test pints

管線名稱	編號	日期\電位 (Cu/CuSO <sub>4</sub> )			
		V1(mV)*	V2(mV)**	3(mV)**	V4(mV)*
		04.23	04.25	05.04	05.08
瓦斯管管線	T1	2440	2354	2250	2360
	T2	1482	1496	1496	1705
	T3	522	656	660	501
	T4	1160	1322	1250	930
	T5	630	668	600	544
	T6	290	996	996	919
備註	*關閉 T2 整流器 **拆開 T6 鍍陽極 *** 關閉中油整流器				

表1. 土壤之腐蝕性分析結果

Table 1. Corrosivity of Soil

檢測項目	檢測值	腐蝕性說明
土壤比電阻係數	7728 (Ω·cm)	腐蝕性低
土壤酸鹼值 (pH)	6.5	孔蝕性低
土壤氧化還原電位	380 (mV) (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	細菌腐蝕性低
綜合評估	此處土壤腐蝕性低	

表4. 整流站功能分析

Table 4. Function of rectifier station

名稱	檢測項目	單位	檢測結果	說明
整流站	額定電壓	V	60	本整流器經改善後最大可輸出電流為7安培
	額定電流	A	30	
	輸出電壓	V	7.34	
	輸出電流	A	0.86	
	地床電阻	Ω	3.2	
	尚餘容量	A	6.14	

表2. 各測試點自然電位分析結果

Table 2. Natural potential of test points

管線名稱	編號	日期\電位 (Cu/CuSO <sub>4</sub> )			
		E1(mV)*	E2(mV)*	E3(mV)*	E4(mV)***
		04.23	04.25	05.04	05.08
瓦斯管	T1	-960	-776	-770	-721
	T2	-950	-773	-772	-712
	T3	-758	-687	-733	-579
	T4	-1010	-798	-788	-687
	T5	-861	-782	-736	-709
	T6	-1348	-514	-539	-444
備註		*關閉 T2 整流器 **拆開 T6 鍍陽極 *** 關閉中油整流器			

表5. 改善前後效果比較

Table 5. Before and after improvement

改善位置	P1	P2	P3	P4	
改善前	DC 電位 (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	-905 mV	-950 mV	-1200 mV	-700 mV
	AC 電壓	2440 mV	1482 mV	1070 mV	1482 mV
改善後	DC 電位 (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	-1918 mV	-1938 mV	-2060 mV	-1600 mV
	AC 電壓	529mV	540 mV	723 mV	553mV
	拆 AC 電流	89mA	137mA	134mA	138mA



圖1. 送檢破損管線  
Fig.1 Defective pipeline

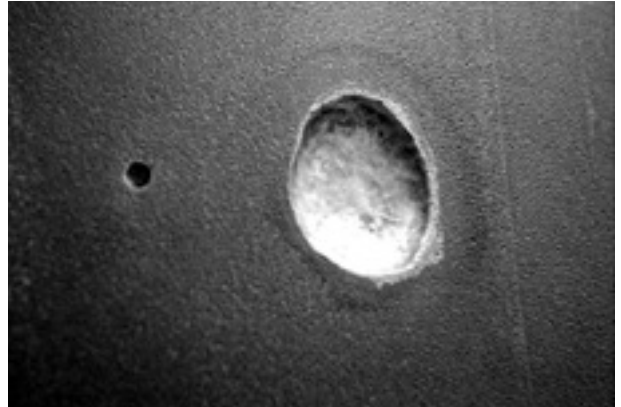


圖4. 電解腐蝕試驗結果  
Fig.4 Results of electrolytic analysis



圖2. 破損位置為 12 點鐘方向  
Fig.2 Defective position is 12 o'clock direction

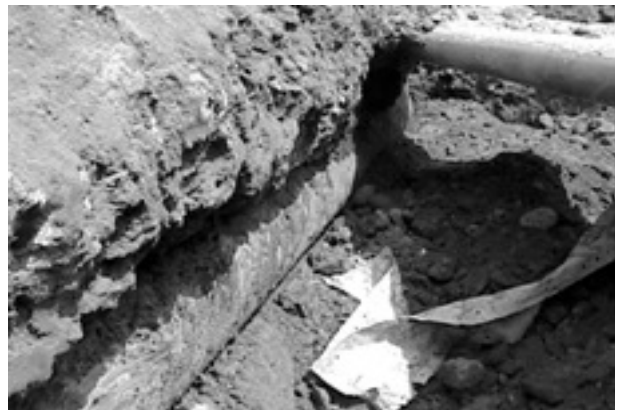


圖5. 管線電位異常 (管線交叉埋設)  
Fig.5 Abnormal potential of pipeline (pipelines intersect each other)

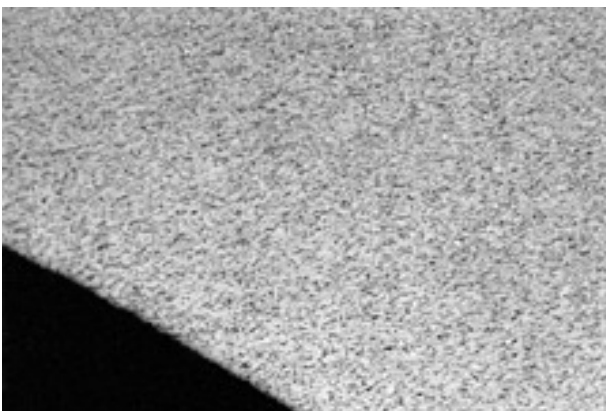


圖3. 破損管線之金相分析  
Fig.3 SEM photo for defective pipeline



圖6. 管線電位異常 (水泥包覆)  
Fig.6 Abnormal potential of pipeline (pipelines cased by concrete)

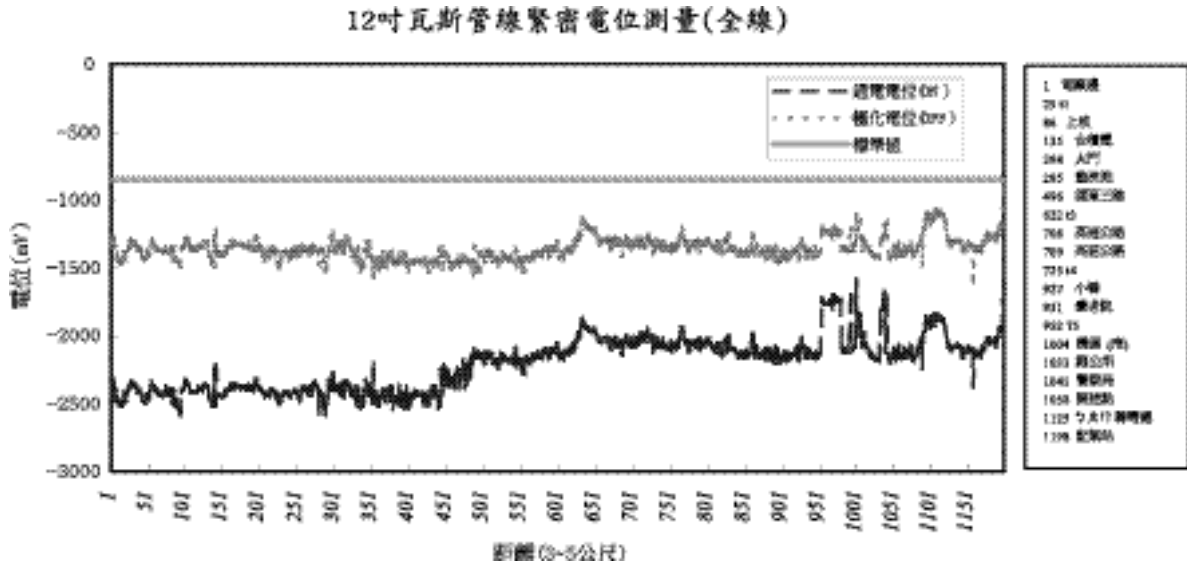


圖7. 全區緊密電位圖

Fig.7 Results of close internal potential survey

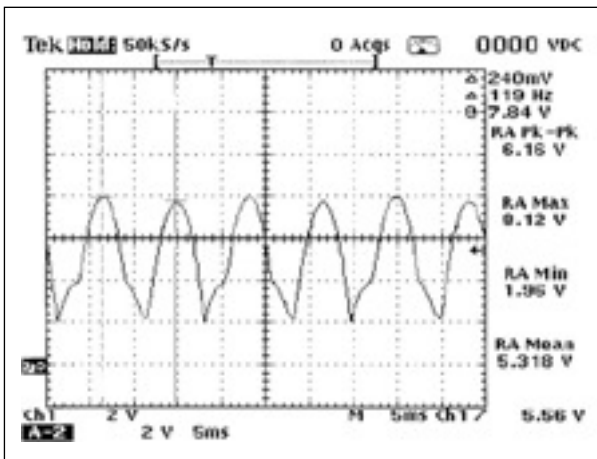


圖8. 原始整流器波形

Fig.8 Original waveform of the rectifier

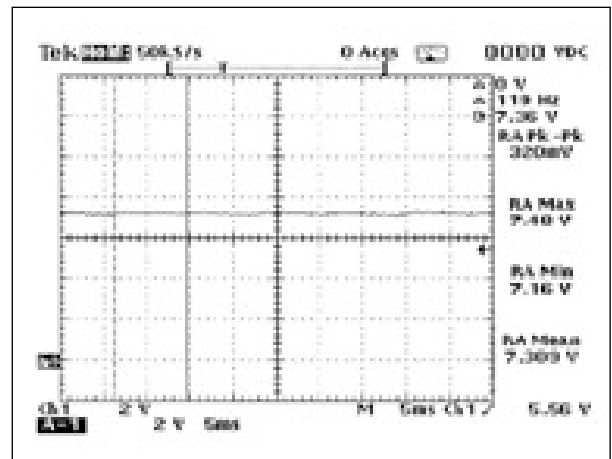


圖9. 整流器濾波整流波形

Fig.9 Waveform after wave filter

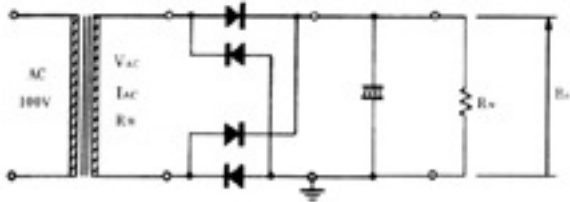


圖 10. 整流器濾波電路

Fig.10 Circuits of wave filter in the rectifier

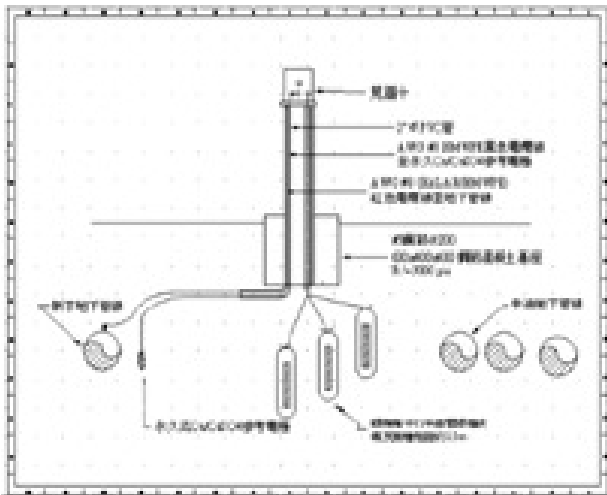


圖 11. 雜散電流選擇排流施工

Fig.11 Drainage