

第五章 電纜劣化模擬與不當施工造成之劣化實例模擬

本章概分為兩部分的模擬，第一部份模擬水樹與空氣隙對於電場之影響；第二部份模擬電纜終端因不當施工造成之電場分佈不均，而致發生事故的一項實際案例。

表 5.1-1 截面積 500mm^2 之 69kV 單芯交連 PE 電纜各層厚度與參數

電纜構造	半徑 (mm)	外徑 (mm)	厚度 (mm)	材料種類	導電率 (S/m)	相對介電係數
導體層	13.55	27.10	13.55	銅	5.998×10^7	1
內半導體層	14.31	28.62	0.76	半導體材質	2	30
絕緣層	32.10	64.20	17.79	交連 PE	10^{-15}	2.3
外半導體層	33.37	66.74	1.27	半導體材質	2	30
遮蔽層	36.00	72.00	2.63	銅	5.998×10^7	1
被覆層	40.00	80.00	4.00	PVC	10^{-16}	2.9

電纜模型係根據[4]的 69kV 單芯交連 PE 電纜規範建立，如表 5.1-1，利用 2D 軸對稱場建立長 10 公分之電纜局部模型如圖 5.1-1。

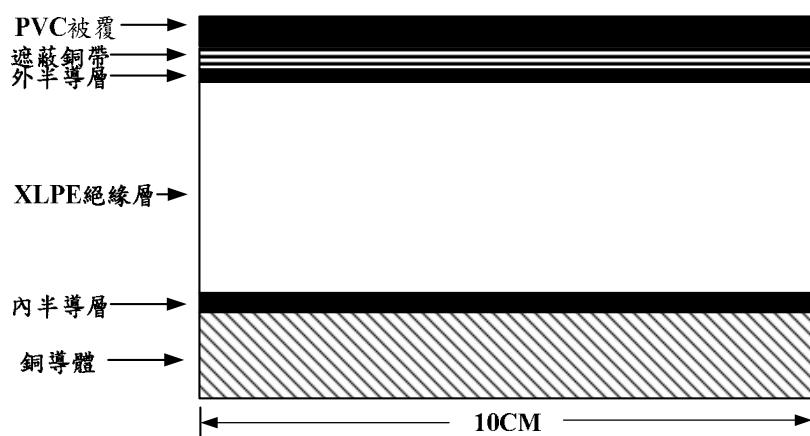


圖 5.1-1 69kV 單芯交連 PE 電纜長 10 公分之模擬模型

5.1 電纜水樹模擬

水樹模型分為兩類：一為以充水小孔及其連結路徑為主體之水樹結構[19]；另一則假設水樹長成區域其相對介電係數會隨之變化，據之進行模擬，而此模擬法之水樹形狀分為單一橢圓形近似水樹[17]，如圖 5.1-2，以及樹叢形水樹[19][20]，如圖 5.1-3。根據文獻[20]觀測之結果，單一水樹之電場最大值發生於水樹頂端處，此電場值略小於叢狀水樹頂端之電場，因此本節採用第二類模擬方法，以評估水樹在電纜絕緣層中形成後對絕緣層電場分佈之影響。

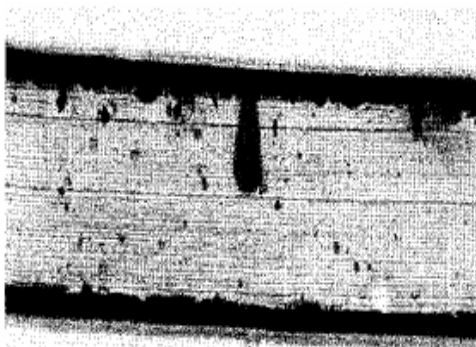


圖 5.1-2 絕緣層內的單一水樹[20]

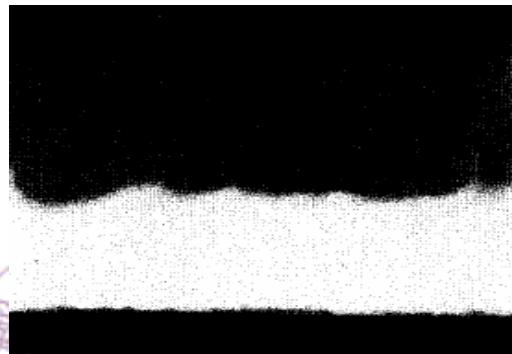


圖 5.1-3 絕緣層內叢狀水樹[20]

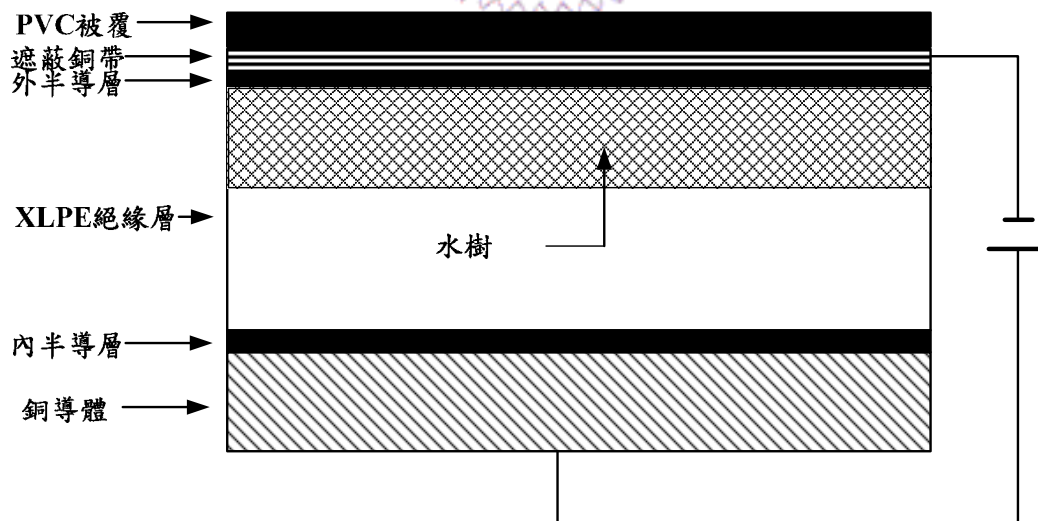


圖 5.1-4 電纜水樹模型示意圖[19]

本水樹模型建立以下兩個假設條件下：

(1) 水樹的平均介電係數與長度呈線性關係

量測水樹的電氣參數，皆利用小樣本施行劣化試驗，再以量測取得相對介電係數值。尚無以實際電纜進行劣化者，因此採用[19]對於水樹相對介電係數的假設，亦即：在絕緣物質中之水樹的整體平均介電係數是與水樹總長度呈線性關係，下式為文獻[18]計算平均介電係數 ϵ_{AVG} 的線性公式：

$$\epsilon_{AVG} = A * y_{total\ tree\ length,(mm)} + B \quad (5.1-1)$$

上式中之 A 與 B 為常數，分別是 2 與 2.7，圖 5.1-5 為預估水樹在 69kV 之交連 PE 電纜絕緣層內，總長由 1mm 長成至 17mm 過程中，水樹整體平均相對介電係數的變化情形。

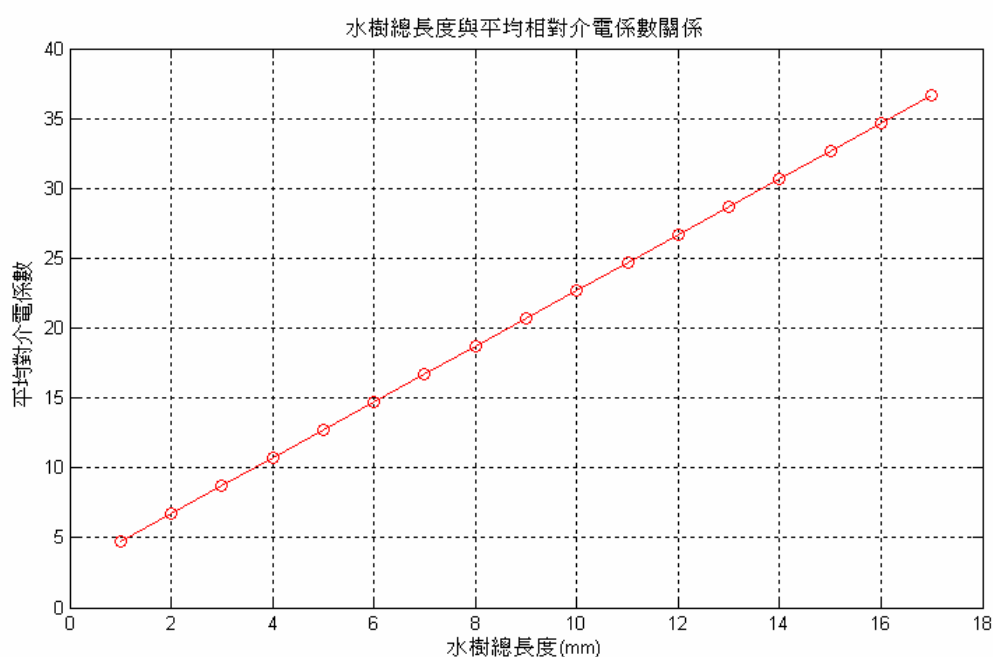


圖 5.1-5 預估水樹總長與平均相對係數的關係

(2) 水樹之介電係數大小由樹根起呈線性遞減

水樹的充水小孔與連結路徑的密度，會隨著劣化時間增長而密度提高，亦即：在水樹之根部處介電係數最大，而水樹頂端之介電係數與絕緣層之材質（ $\epsilon_{XLPE}=2.3$ ）相同[19][20]。

5.1-2 式為水樹內各點之相對介電係數計算方程式，由於假設之水樹模型為樹叢形水樹，因此假設水樹在橫向 X 軸之介電係數沒有變化，僅在 Y 軸方向變化，再假設水樹在 Y 軸之變化為線性，遂可以利用 5.1-2 式求得水樹內各點之相對介電係數值，公式中的 C 與 D 皆為常數，但會根據水樹總長度而變化。

$$\varepsilon = C * y_{from\ tree\ root, (mm)} + D \quad (5.1-2)$$

求出平均介電係數後，利用水樹在 Y 軸方向的介電係數積分值等於平均介電係數 ε_{AVG} 與水樹總長度 y_{max} 之乘積，以及水樹頂端之相對介電係數等於交連 PE 絕緣層之介電係數，此二公式聯立後，可得 5.1-3 式，即可求得常數 C、D 值。之後帶入至 5.1-2 式，可計算出不同水樹長度時各點之相對介電係數值。圖 5.1-6 為水樹總長度 0mm 到 17mm 時，各長度情況下水樹內各點之相對介電係數變化。

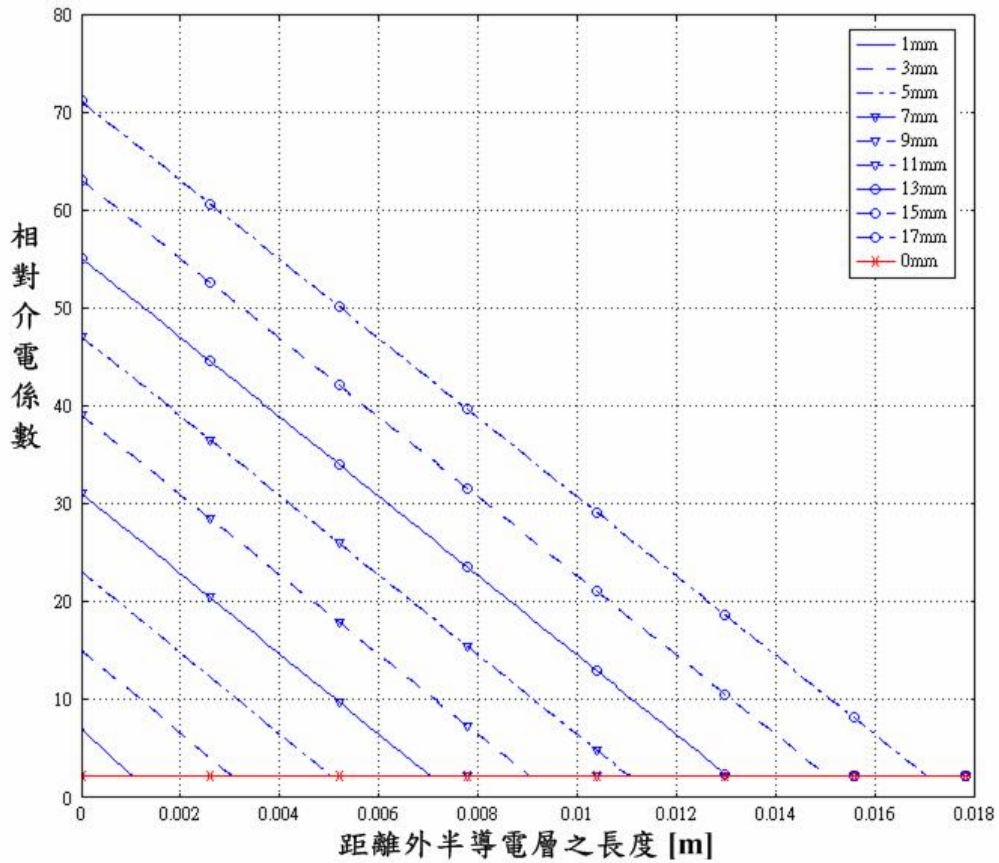


圖 5.1-6 不同長度之水樹介電係數與位置相對關係

$$\begin{cases} \int_0^{y_{Max}} (C * y_{from\ tree\ root, y(mm)} + D) dy_{from\ tree\ root, y(mm)} = \varepsilon_{AVG} * y_{Max} \\ \varepsilon_{XLPE} = 2.3 = C * y_{from\ tree\ root, y(mm)} + D \end{cases} \quad (5.1-3)$$

得知水樹各長度時之介電係數後，即可利用圖 5.1-4 的模型進行有限元素分析，以求得該 69kV 電纜正常運轉（指施加電壓為

$69kV * 1.05 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 59.16kV, 60Hz$ ）時的電場分佈狀況，模擬結果如圖 5.1-7。由

圖可知：當水樹長成時，由於水樹區域的相對介電係數遠大於交連 PE 絕緣層的介電係數，致使尚未劣化的交連 PE 區域之電場值比原先無水樹前之電場值高。由圖 5.1-7~5.1-9 可知：水樹造成之最大電場與其總長度成指數關係增加，最大電場的放大率可達 7 倍左右，但即使水樹已成長至佔據整體絕緣層 95% 的程度，其最高點之電場僅達到約 $2.4 * 10^7 V/m$ ，還是低於一般交連 PE 絕緣耐壓等級的 $3 \sim 5 * 10^7 V/m$ ，不會直接傷害絕緣。但是水樹的威脅非在其本身，而是由於水樹頂端過度集中的電場造成的電樹劣化，當水樹發展出電樹時，會在數小時至數天內擊穿絕緣層，造成故障，這也是水樹侵蝕電纜造成電纜故障的主要原因。

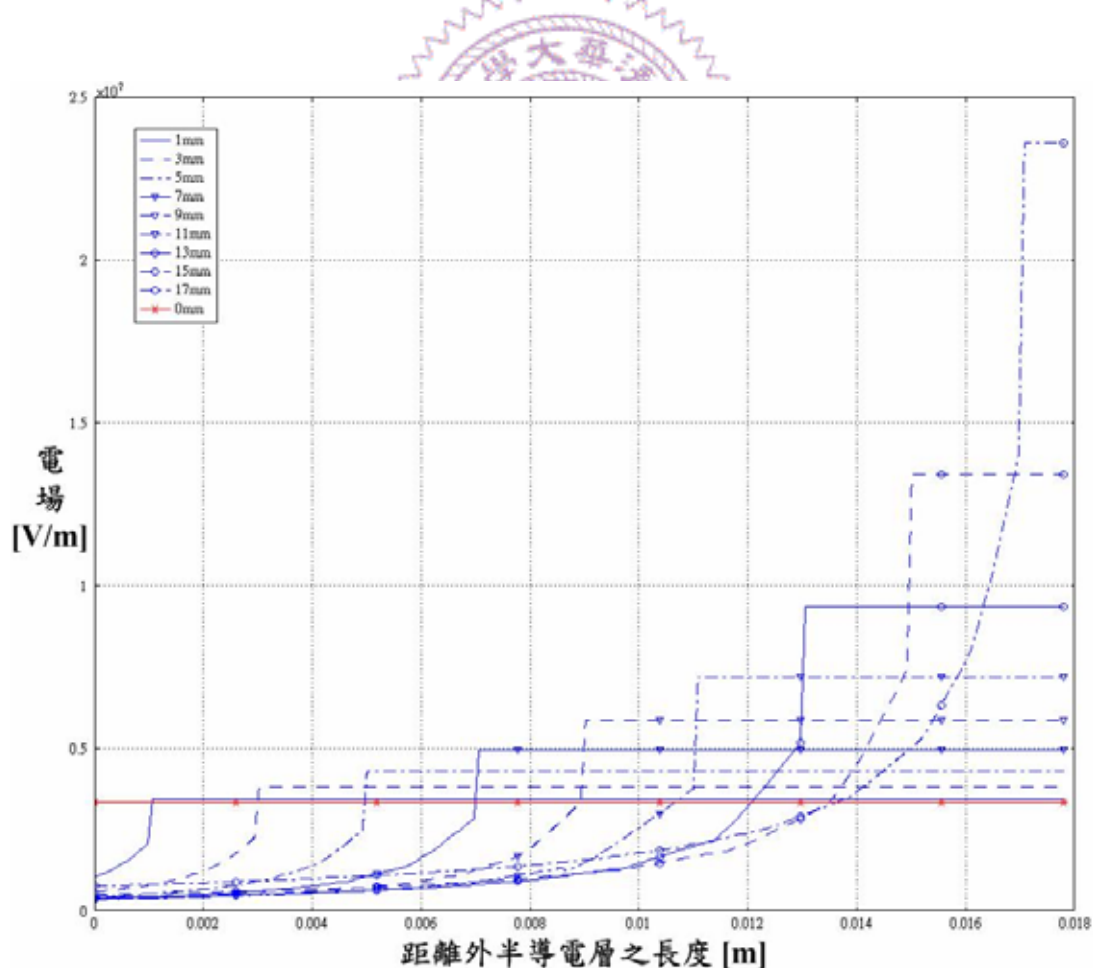


圖 5.1-7 不同長度之水樹電場狀況與位置之相對關係

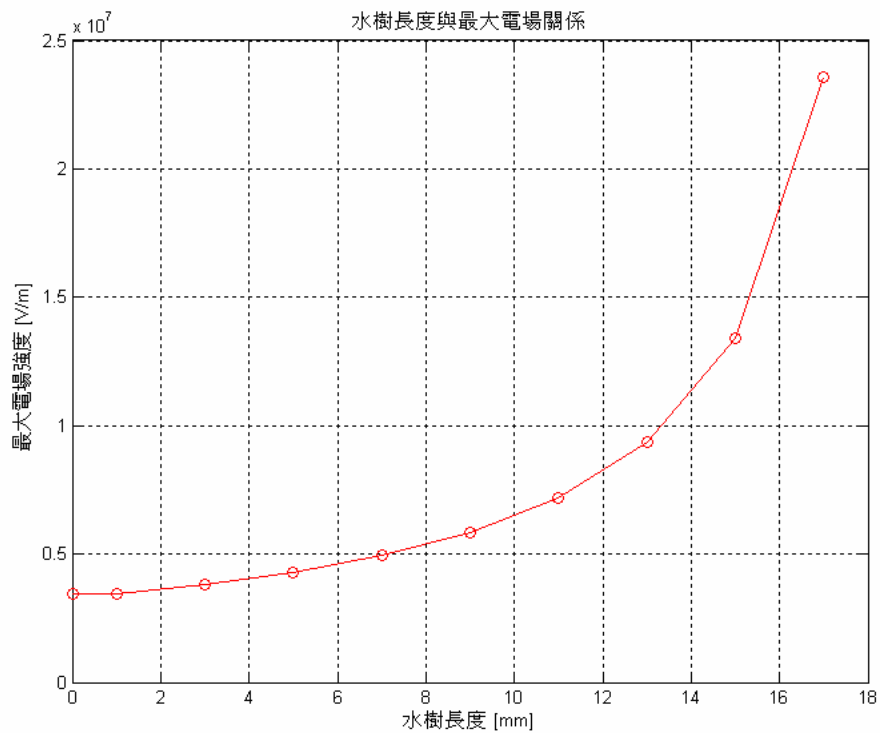


圖 5.1-8 水樹總長度與最大電場關係

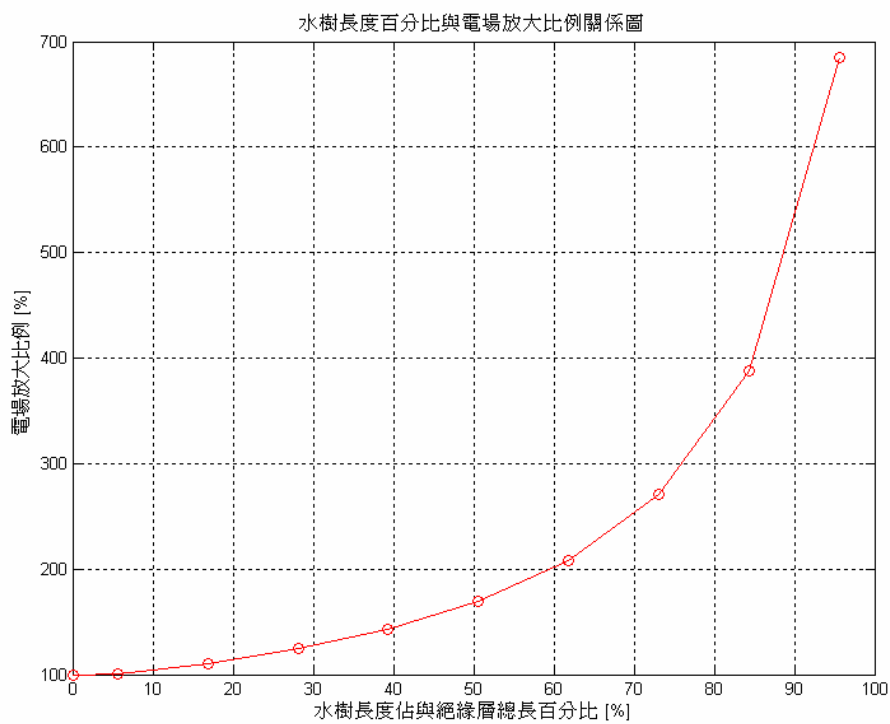


圖 5.1-9 水樹總長度與電場放大率關係

5.2 電纜氣隙局部放電之模擬

第 3.2 節對於局部放電量測原理已作說明，當絕緣陷的跨電壓超過起始放電

電壓後則放電，釋放電荷量，並造成絕緣層周圍磁場變化，局放量測即以此電荷量或磁場變化作為判定標準，可以量測大部份常見之絕緣缺陷，例如水樹、電樹、內部空洞放電、尖端放電及沿面閃絡等。

本節所建立之局部放電模型如圖 5.2-1，假設交連 PE 絕緣層的表層有一個寬 1cm 高 0.1cm 的半橢圓凹陷位於外半導體層間，該凹陷處電場之方向示於圖 5.2-2，可知：缺陷內為均勻電場（Homogeneous Electrical Field）。在氣隙放電方面，本文假設當氣隙最寬處，即 A、B 兩點之電位差超過放電起始電壓時，整體氣隙產生放電現象，使導電率由 10^{-15}S/m 於 0.5ms 內急速提升至 10^{-4}S/m [22]，而放電起始電壓的計算方面，由於此處空氣內之電場為均勻電場，因此可以利用第 3.2.2 節的巴森定律計算得之。

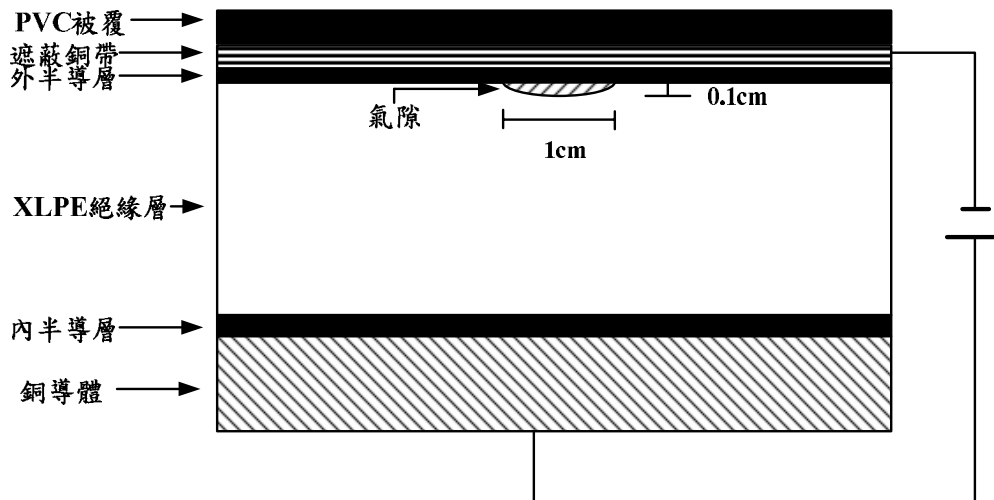


圖 5.2-1 電纜局部放電模型示意圖

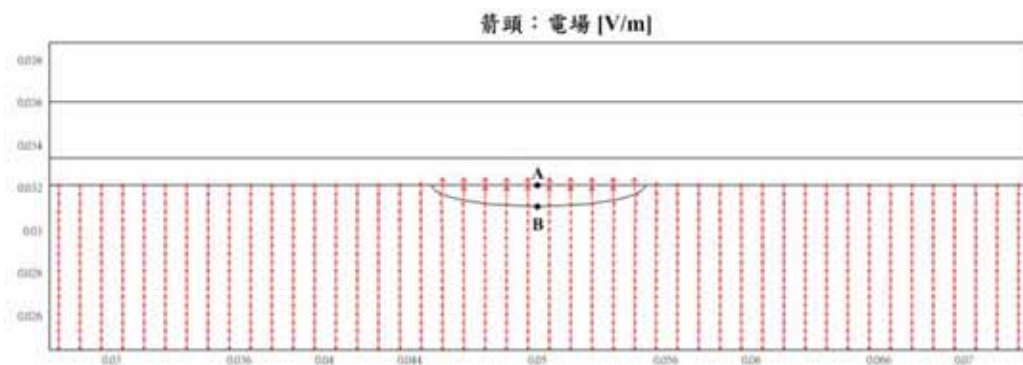


圖 5.2-2 絕緣層凹陷處電場方向

巴森放電電壓之計算公式如 5.2-1 式，首先假設該氣隙內的大氣壓力為標準

大氣壓 101.325kpa，而 A、B 兩點的距離為 d (=0.1cm)，可得該氣隙之 pd 乘積為 10.1325kpa-cm，其餘常數根據表 5.2-1[23]，帶入至 5.2-1 式計算該凹陷處之放電電壓。

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln\left[\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right]} = \frac{Bpd}{\ln(pd)+c} \quad \text{其中 } c = \ln\left[\frac{A}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right] \quad (5.2-1)$$

表 5.2-1 常見氣體之巴森相關常數

氣體種類	A Ioni/kPa-cm	B V/kpa-cm	pd 乘積 KPa-cm	C
空氣 (Air)	112.50	2737.50	0.0133-0.2	$2.0583(pd)^{-0.1724}$
			0.2-100	$3.5134(pd)^{0.0599}$
			100-1400	4.6295
氮 (N ₂)	90.00	2565.00	0.0313-3	$2.5819(pd)^{-0.0514}$
			3-100	$2.4043(pd)^{0.1030}$
			100-1400	3.8636
六氟化硫 (SF ₆)	95.25	2189.25	0.3-3	$\ln[2.0583(pd)^{-0.1724}]^4$
			3-1200	$\ln[2.0583(pd)^{-0.1724}]$

經 5.2-1 式計算，得該氣隙 A、B 兩點的放電電壓為 4366.8V 後進行有限元素之模擬，電纜模型之相關數據亦根據表 5.1-1 建立，其餘的模型參數設定如下

(1) 氣隙垮壓 V_{AB} 在達到放電電壓 $V_{inc}=4366.8V$ 後，空氣擊穿，形成電弧導通路徑，而導電率由 $10^{-15}S/m$ 於 0.5ms 內急速提升至 $10^{-4}S/m$ [22]，並在跨壓降至熄滅電壓 $V_{ext}=10V$ 後電弧熄滅，導電率也降回 $10^{-15}S/m$ 。

(2) 施加電壓為 69kV,60Hz 之單相運轉電壓，亦即施加

$69kV * 1.05 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \sin(2\pi t)$ 的電壓於電纜進行暫態模擬，取得氣隙跨壓變化情形與約 50 次局放結果的相位及大小進行統計。

(3) 局部放電的視在電荷量 Q 之計算係根據起始放電電壓 V_{inc} 、熄滅電壓

V_{ext} 、驟降電壓 ΔV 與氣隙的電容 C 計算得之，如 5.2-2 式[21]。

$$Q = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} * (E_{inc} - E_{ext}) * d = C * (V_{inc} - V_{ext}) = C * \Delta V \quad (5.2-2)$$

圖 5.2-3 為加壓後 3 週期內氣隙之跨壓，藍色線為無擊穿狀況下氣隙之跨壓，紅色線為局放下氣隙跨壓，每當氣隙跨壓超過 4366.8kV，氣隙跨壓因電弧而驟降，驟降所釋放的電子促成下次的局部放電，此反覆放電會劣化氣隙週遭的絕緣材料。圖 5.2-4 為經計算的視在電荷量及其相位。其中視在電荷量是由電容量與驟降電壓決定之，本模擬除放電電壓會有些許變化，其餘皆為定值，因此模擬所得之放電量不會有鉅額的浮動，與實際放電量（圖 5.2-5）有所差異，但主要之內部放電相位特徵皆相符合（0~90°、180~270° 與 360°）。

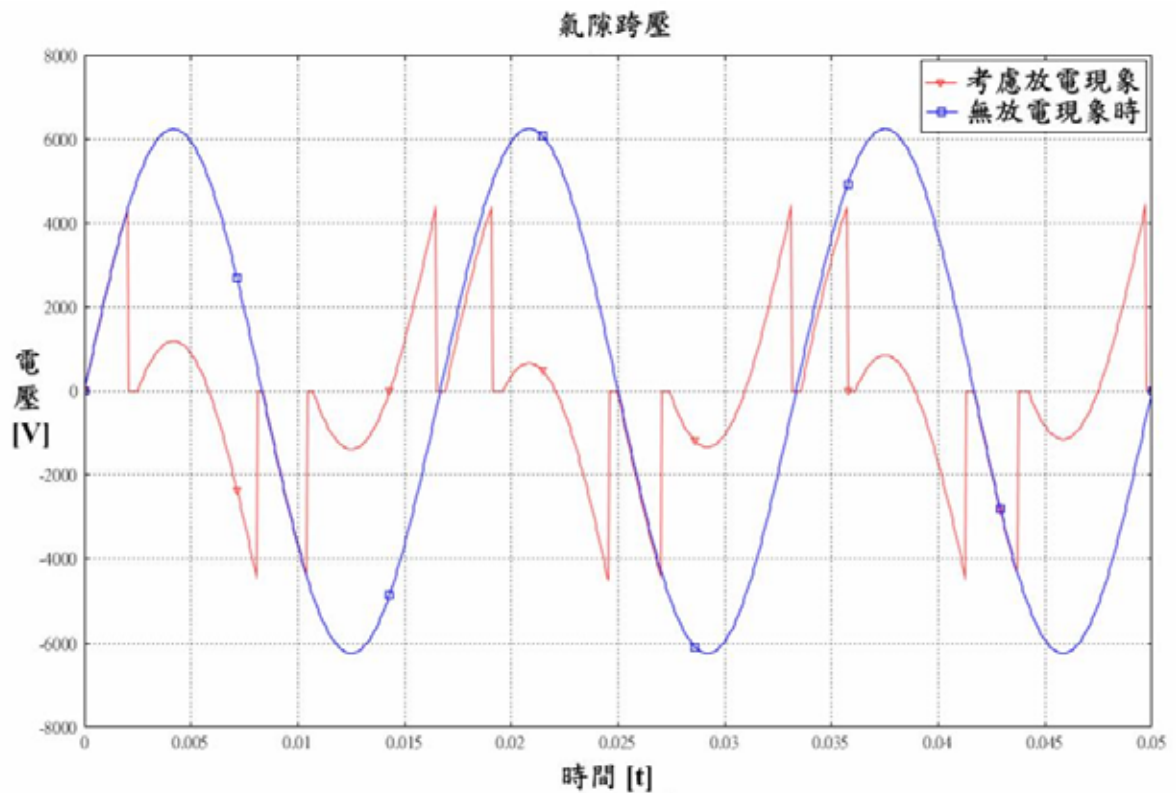


圖 5.2-3 三週期內的氣隙跨壓變化情況

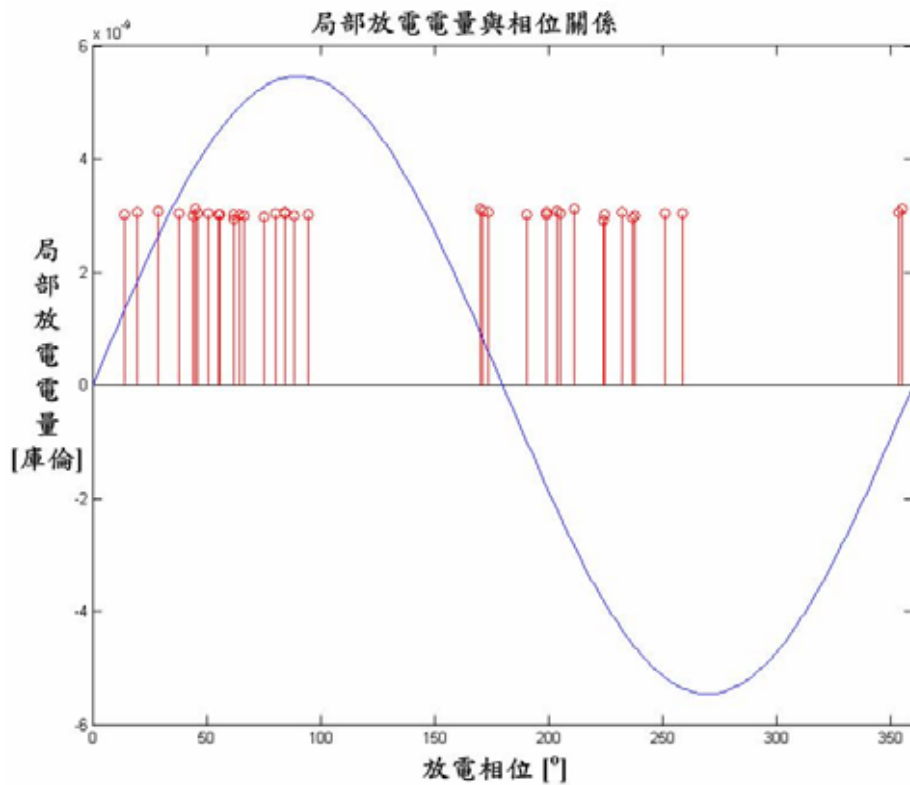


圖 5.2-4 局部放電相位與放電量大小

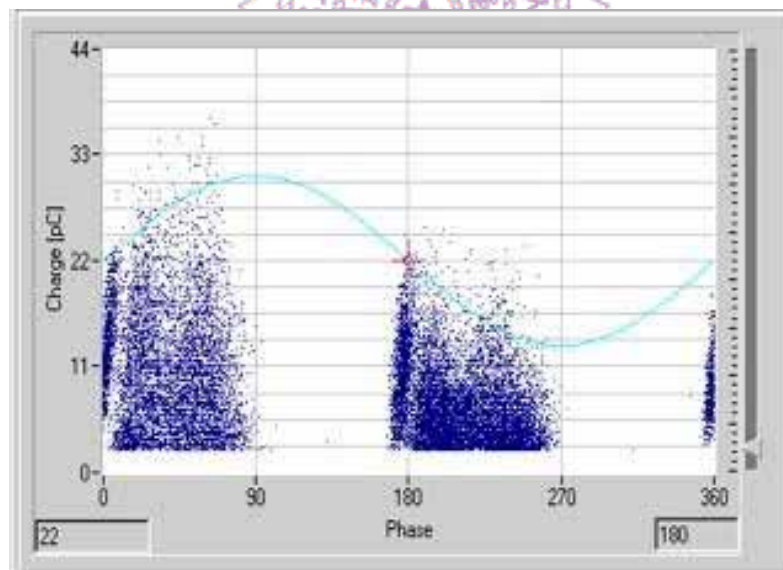


圖 5.2-5 實際局部放電相位與放電量大小

5.3 因施工不當造成電場劣化之實例模擬

本節以某高科技面板廠的69kV電纜終端事故為例，分析施工不當造成之電場非均勻分佈。事故發生於預鑄式電纜終端，由於施工不當，在運轉僅一年後就發生故障，本節模擬並評估其施工正確與否對於電場之影響。

5.3.1 預鑄式電纜終端結構

該面板廠所使用之電纜終端構造如圖5.3-1，所用的電纜規格如圖5.3-2，此電纜終端的施工法與一般電纜終端施工法無異，唯一的差異是該電纜終端施工時利用導電銀漆代替矽脂膏，並搭配電纜終端內層的黑色導電塗佈層以及多層凹槽式構造來紓緩電應力。但在安裝施工時，並未按照正確的施工程序進行，致終端與電纜間留有空隙，且在故障之S相亦未塗抹導電銀漆，使劣化加速而導致故障。

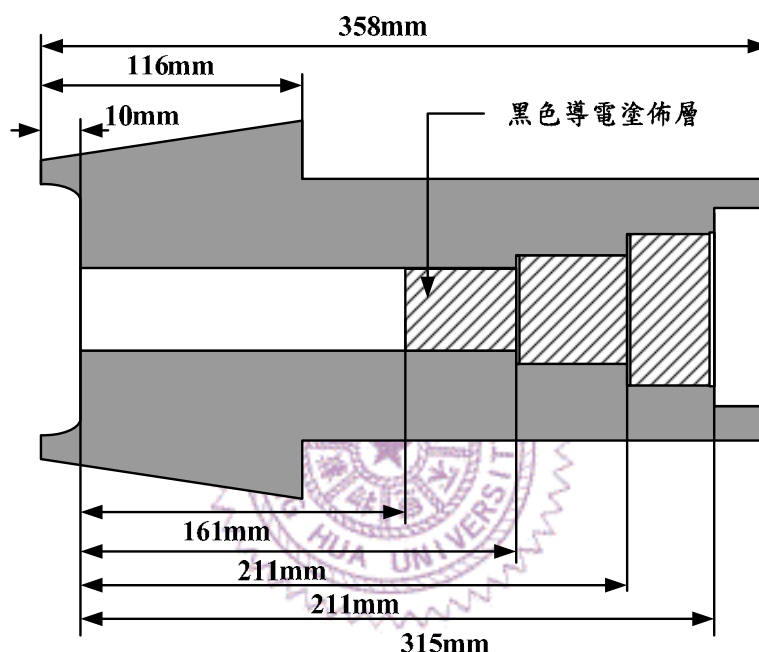


圖5.3-1 面板廠使用之預鑄式電纜終端規格

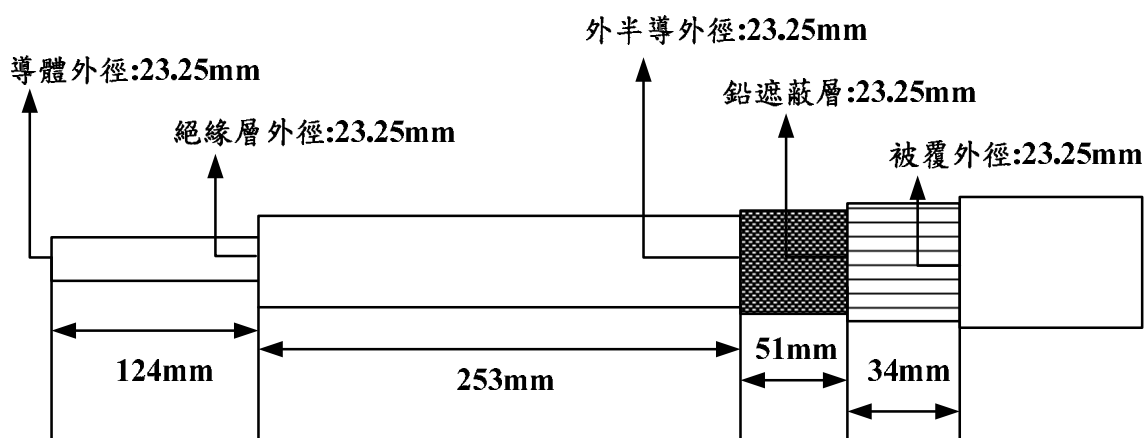


圖5.3-2 面板廠事故電纜規格與各層切割長度



圖5.3-3 面板廠使用之預鑄式電纜終端實體

在S相故障後，該廠亦以更換R、T掉另外兩相的終端，在解剖未故障的T相電纜後，發現：該相的施工法亦不符合標準作業程序，導致該相電纜亦有輕微的劣化現象，S相及T相之解剖如圖5.3-4。



圖5.3-4 事故電纜S相及T相之解剖圖

5.3.2 預鑄式電纜施工缺陷評估

本模擬使用之模型說明如下，圖 5.3-5 為正常施工之模型，各層長度依照電纜終端內各凹槽長度切割，使電纜本體與電纜終端契合，不留下氣隙，而外半導體層末端綑綁 13 號半導體膠帶與導電銀漆，該電纜終端模擬所使用之參數如表 5.3-1 所示，導體施加電壓設定為 $69kV * 1.05 * \sqrt{2} / \sqrt{3} = 59.16kV$ ，由於黑色導電塗佈層材質不明，因此暫假設該層為 1.5mm 厚之半導體特性橡膠材質。

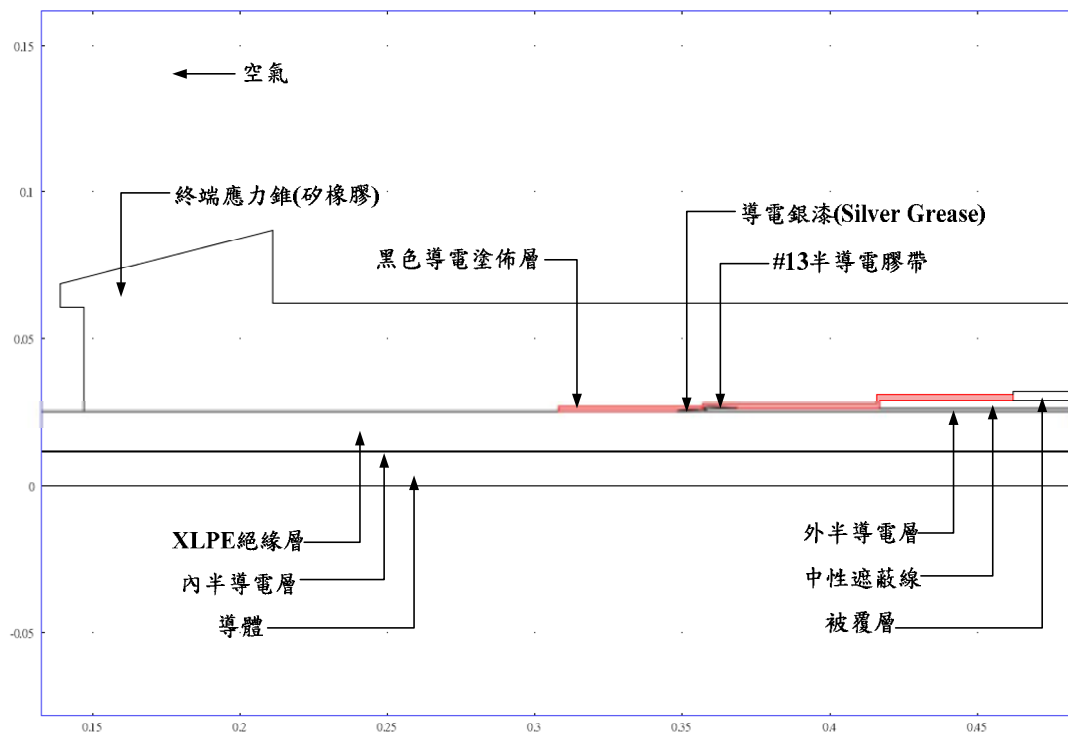


圖 5.3-5 預鑄式電纜終端正確施工之模型

表 5.3-1 預鑄式電纜終端模型參數

材質	導電率 (S/m)	相對介電係數
應力錐(矽橡膠)	10^{-15}	4
13 號半導體 EPR 膠帶	2	4
導電銀漆	1	1
黑色導電塗佈層	0.1	4

利用有限元素法分析正常施工之電纜終端時，在運轉電壓時之電位線分佈如圖 5.3-6，由於該終端具有半導體特性之黑色導電塗佈層，電應力會集中該層終端處，最大電場出現於黑色導電塗佈層終端的電纜絕緣層表面，其值為 $1.09 \times 10^7 \text{ V/m}$ 遠低於交連 PE 本身之崩潰電壓，如圖 5.3-7。

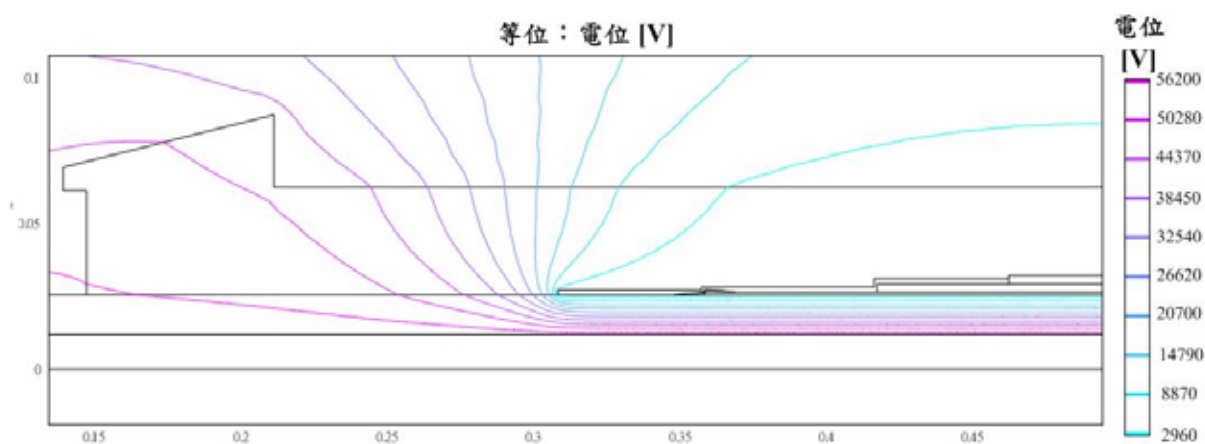


圖 5.3-6 正常施工之電纜終端的電場分佈

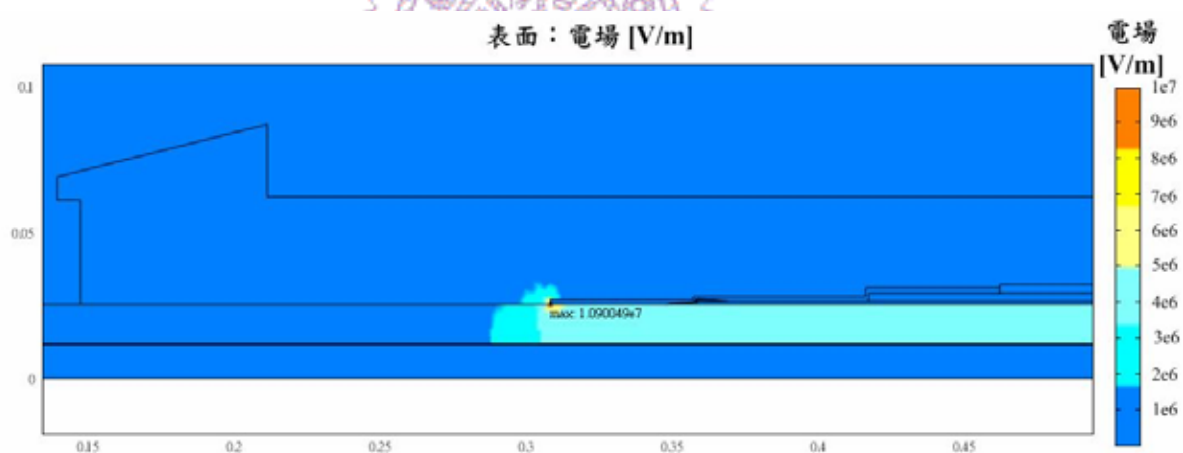


圖5.3-7 正常施工之電纜終端的電位線分佈

(1) 故障之S相終端

S相電纜為電纜終端故障點，圖5.3-8係根據事故分析報告書繪製的S相電纜與終端應力錐之相對位置，可知：故障點位於應力追內多層凹槽中最前端凹槽之末端，本節依此構造，建立有限元素分析模型，分析事故原因。

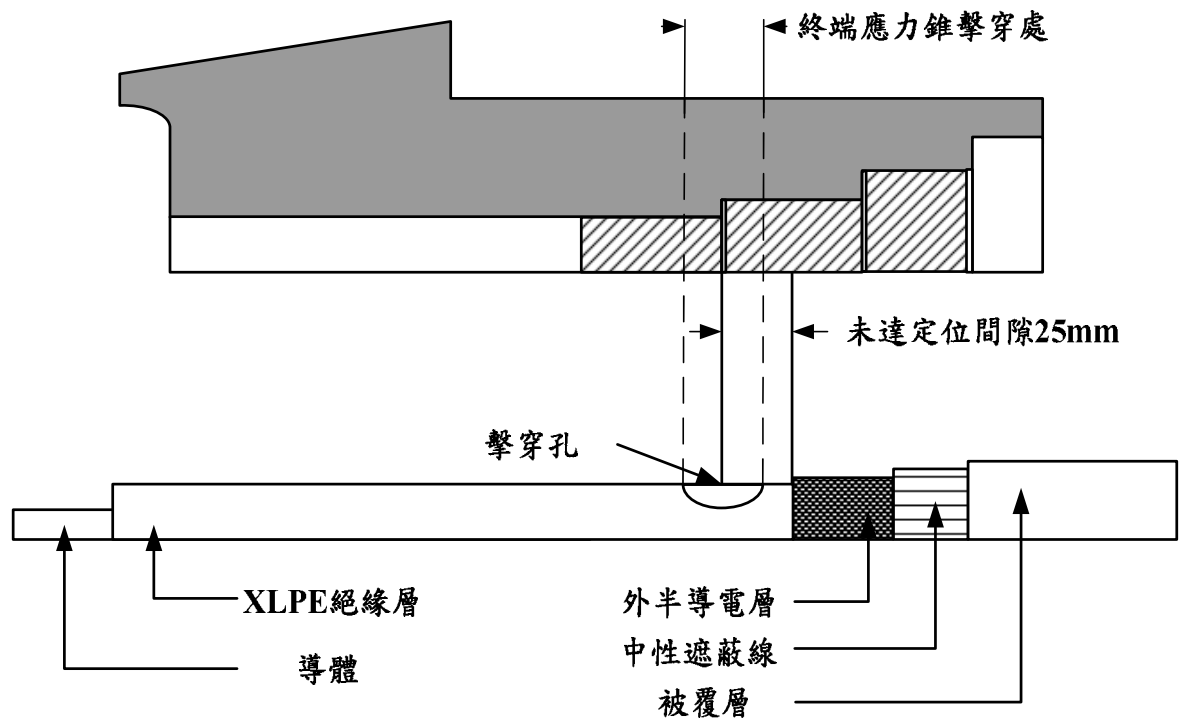


圖5.3-8 S相電纜與終端應力錐之相對位置



圖5.3-9 S相電纜解剖實體

根據實體圖可知：電纜擊穿處附近的應力錐凹槽有一項在報告書沒有提到的微小縫隙，即圖5.3-10所標示處，由位置及厚度推測此縫隙應該為設計讓額外纏繞的13號半導體膠帶及導電銀漆定位於此而設計的，由於該處為擊穿點，此縫隙

可能會造成影響，因此，雖然報告書未予提及，但依然將此細縫列入模型的考慮範圍內據之進行模擬。



圖5.3-10 應力錐最前端凹槽邊緣之縫隙

圖5.3-10為S相模型施工處之放大圖，此相之施工處由於未細綁13號半導體膠帶且無塗抹導電銀漆，因此在外半導體層末端處留下一個氣隙，模型中除施工處以外其餘部分皆與圖5.3-5相同。

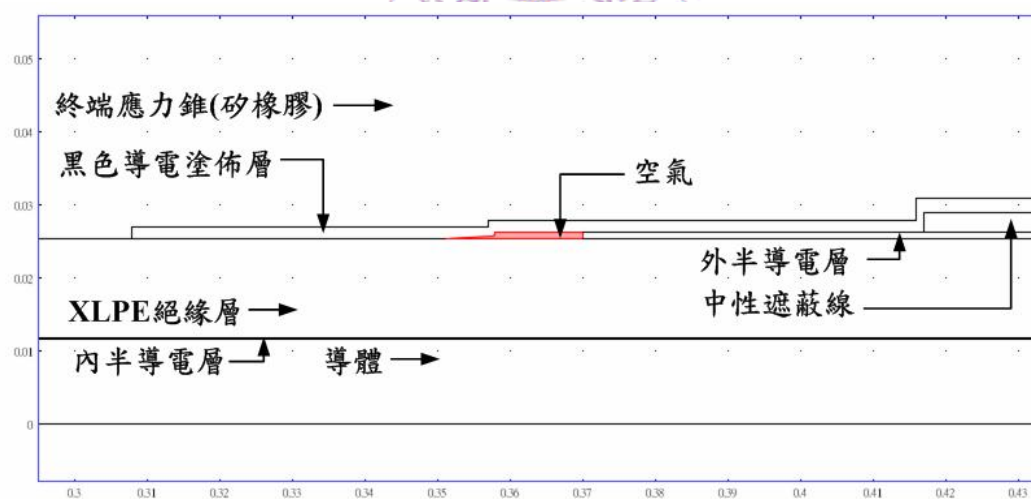


圖5.3-11 S相模型施工處之放大圖

模擬結果如圖5.3-12，可知：施工處的電場主要集中在原本應該以導電銀漆以及13號半導體膠帶填充之隙縫，該隙縫之電場高達 $9.8 \times 10^7/\text{m} \sim 1.43 \times 10^7 \text{V/m}$ ，是空氣絕緣耐壓的2倍以上，氣隙電場強度也為空氣絕緣耐壓的1.5倍，最大電場則

發生在最前端凹槽之末端，也就是電纜的終端應力錐擊穿處以及電纜擊穿處的中心點，模擬結果與實際的擊穿點位置吻合。

該電纜終端由於構造設計的關係導致在施工不良時，例如外半導切除長度與套管預留長度不符合、未塗抹導電銀漆或未綑綁半導電膠帶等原因，比起其他類型的電纜終端更容易在終端處留下氣隙，由圖5.3-9可知：擊穿處長度與留下之氣隙長度幾乎完全符合，可見事故主因就是施工不良導致氣隙殘留緣故。

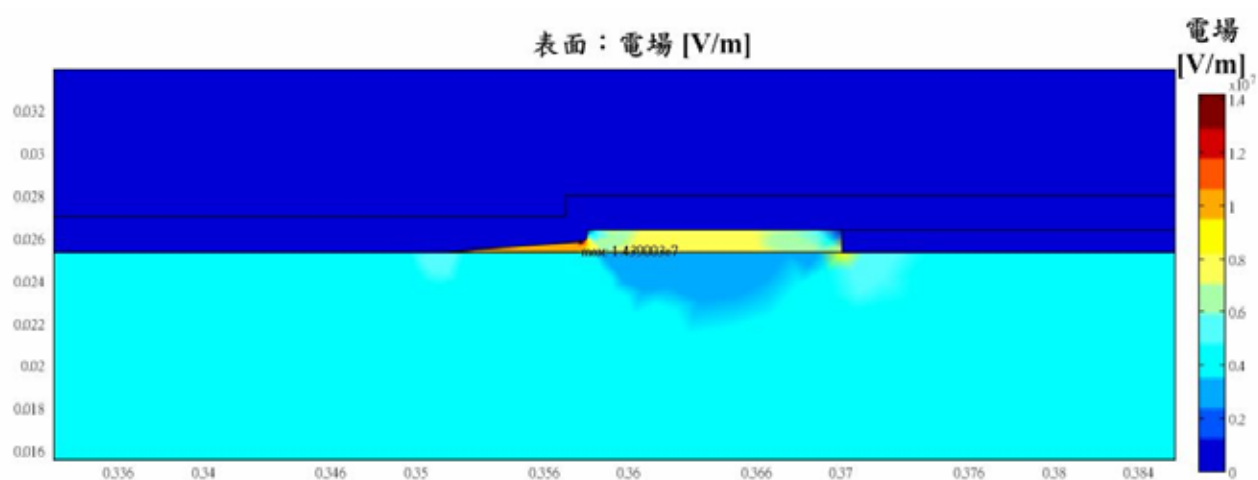


圖5.3-12 S相施工處電場分佈

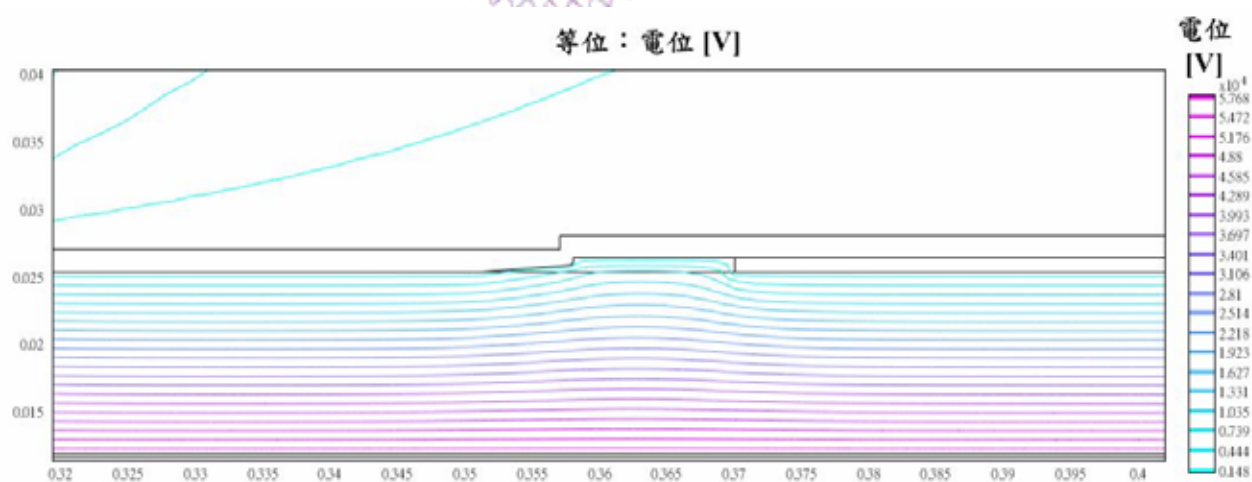


圖5.3-13 S相施工處電位分佈

(2) 未故障之T相終端

T相電纜在解剖時雖然尚未發生事故，但其導電銀漆已有部分變色，可能為銀漆周圍殘餘空氣在加壓時溫升造成之結果，整體T相電纜結構及模型構造如圖5.3-14。

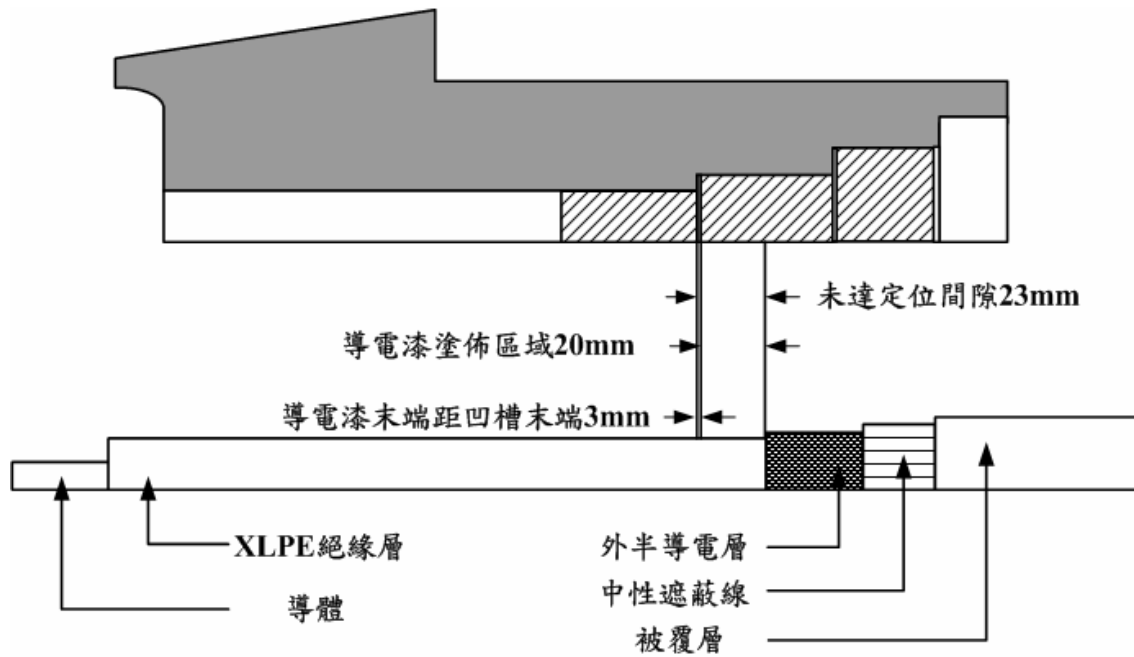


圖5.3-14 T相電纜與終端應力錐之相對位置示意圖



圖5.3-15 T相電纜解剖實體圖

由解剖圖可知：雖然有網綁13號半導體膠帶，但該膠帶網綁於外半導體層中段，基本上無法發揮效果，因此在模型中不列入考慮，而施工處的模型亦根據圖5.3-16與5.3-17進行建立。



圖5.3-16 應力錐前端凹槽邊緣之縫隙 圖5.3-17 應力錐前端凹槽銀漆殘留狀況

T相電纜的施工狀況與S相較比，除未塗抹導電銀漆以外，其餘相同，而銀漆塗抹狀況根據結構示意圖為塗抹到凹槽末端前3mm處。S相與T相在凹槽終端皆留有縫隙，兩個模型遂對此皆納入模擬。由圖5.3-16及5.3-17可知：該縫隙被導電銀漆填滿，僅剩下約3mm寬的氣隙存在於凹槽末端。因此根據上述資料建立之電纜終端施工處模型如圖5.2-18，以此模型評估T相之電場。

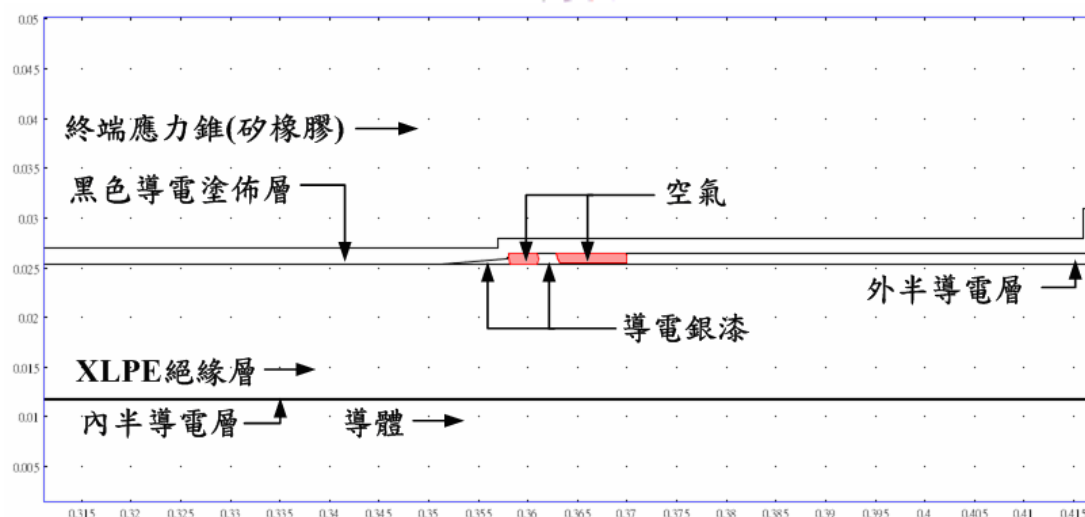


圖5.3-18 T相模擬模型施工處放大圖

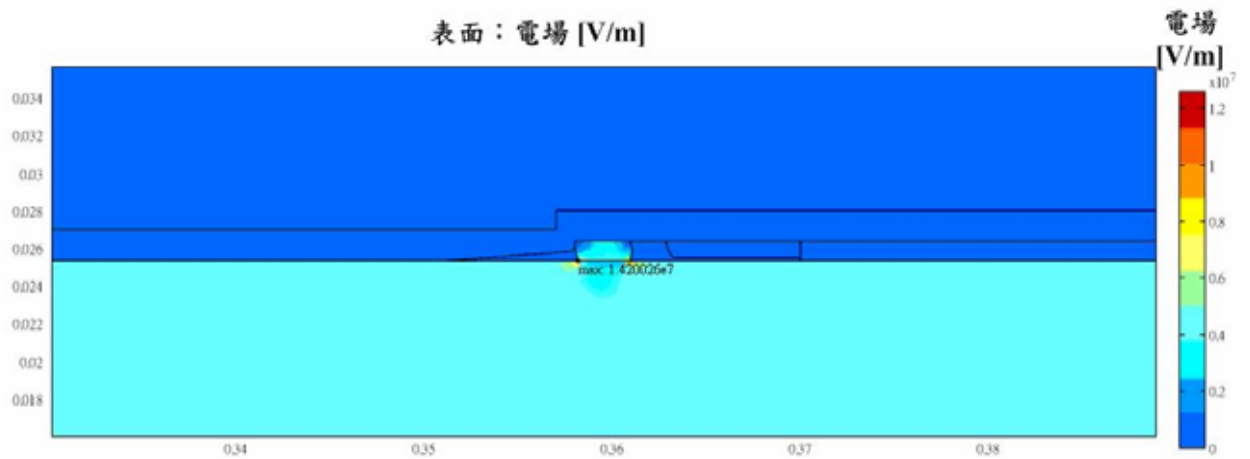


圖5.3-19 T相模擬模型施工電場

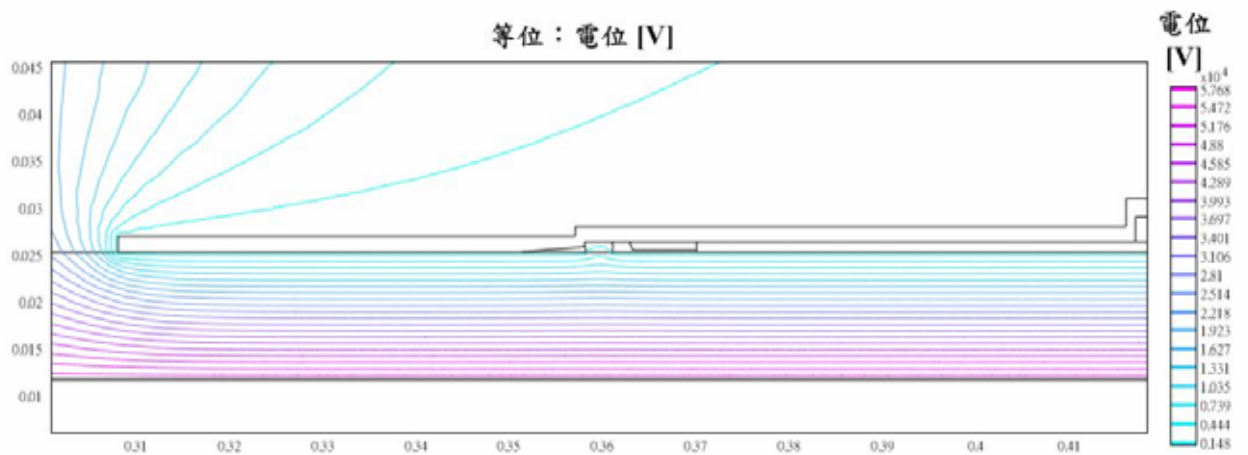


圖5.3-20 T相模擬模型施工電位

模擬結果如圖5.3-19~5.3-20可知：T相電纜由於有塗抹導電銀漆，電位線的曲折較為平緩，施工處的最大電場發生在銀漆、空氣與絕緣層交界處的銀漆表面，雖然電場值高達 $1.42 \times 10^7 \text{ V/m}$ ，但僅分佈在一小部份的絕緣層表面，而空隙內空氣承受之電場都在空氣的絕緣耐壓附近或更低，不會有明顯的放電現象，如圖5.3-16，凹槽末端與部份雖無導電銀漆，但在運轉一年多後劣化現象仍不明顯。