

出國報告（出國類別：研究）

電纜管路低熱阻抗充填材 之使用

服務機關：台灣電力公司北區施工處

姓名職稱：陳玉川 11 等電機工程監

派赴國家：日本、美國

出國期間：101 年 10 月 1 日至 101 年 11 月 11 日

報告日期：101 年 12 月 26 日

出國報告審核表

出國報告名稱：電纜管路低熱阻抗充填材之使用		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
陳玉川	電機工程監	台灣電力公司 北區施工處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input checked="" type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他 _____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：101年10月1日至101年11月11日		報告繳交日期：101年12月26日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 4.內容充實完備。 <input checked="" type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9.本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他 _____ <input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式: 出國報告內容具參考價值,請送各區施工及各供管區營運處各2份	



說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報告人		審核人		單位		主管處		總經理	

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：電纜管路低熱阻抗充填材之使用

頁數 42 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳玉川/台灣電力公司/輸變電工程處北區施工處/十一等電機工程監/(02)26622651

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：101.10.1~101.11.11 出國地區：日本、美國

報告日期：101.12.26

分類號/目

關鍵詞：電纜管路、低熱阻抗、回填材、Fluidized Thermal Backfill、TC Grout

內容摘要：(二百至三百字)

土壤熱阻率及電纜管溝充填材料之熱阻率，對電纜之散熱效能及送電容量之影響很大。

日本 TOENEC 公司與中部電力等公司共同研發之推進管內低熱抵抗充填材(TC Grout)，以及美國 GEOTHERM 公司所設計之流動性低熱阻抗回填材料(FTB)，具低熱阻率及熱穩定性，有助於解決管溝回填材料熱阻抗過高的問題，並能提升電纜管路之送電容量，其設計理念與施工經驗值得學習與參考。

本次到日本 TOENEC 公司研習 TC Grout 之材料特性及使用情形，以及參加美國 Power Delivery Consultants(PDC)公司所舉辦的電力傳輸與低熱阻回填材料(FTB)相關課程，研習電纜管路、推管之導熱回填材料之組成、特性及使用情形，並增進土壤熱性質(thermal property)之了解，對於本公司電纜線路工程之規劃、設計與施工將有所助益。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目次

頁次

摘要	1
壹、計畫緣由及過程.....	2
一、計畫緣由.....	2
二、過程.....	3
貳、研習內容	6
一、日本推進管內低熱阻抗充填材（TC-Grout）材料特性及使用	6
二、土壤熱性質與電纜送電容量	14
三、電纜管路低熱阻抗充填材料相關研究.....	25
四、流動性低熱阻抗回填材料（FTB）之特性.....	30
五、流動性低熱阻回填材料（FTB）之使用.....	33
參、心得與建議	37
肆、參考文獻	40

摘要：

隨著電力需求不斷增加，在新設線路受路權限制及成本考量下，如何能有效提升輸電線路之送電電流，又能符合最高運轉溫度之條件限制，已成為電力公司努力的目標。

電纜的送電容量取決於電纜之運轉溫度，電流產生的熱損，藉由周圍的土壤傳遞到地表，倘土壤或管溝回填材料之熱阻值過高，將不利於電纜散熱，對電纜的送電容量造成很大影響。而土壤固有熱阻抗大小差異可由 $30\sim 500^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ ，是計算電纜送電容量的最大變數。若低估土壤之熱阻抗值將對送電安全有潛在危害。

國外對於電纜管溝導熱回填材料之發展及使用已有數十年經驗，研究證實對於改善電纜管路之熱阻及提升電纜之送電容量有很大的效益。故對於國外使用低熱阻抗充填材料之認識及土壤熱性質之了解，將有助於本公司電纜管路之設計與施工，並能提升電纜之送電容量，及減少事故的發生。

壹、計畫緣由及過程

一、計畫緣由

基於安全與維護考量，本公司有越來越多的電纜管路工程，如青溪~桃園 161KV 線電纜管路工程之推進管，採混凝土充填方式處理，以免除推進管中另須增設照明、通風及排水等系統，降低維護成本；另目前地下電纜管路的開挖，公路管理單位均要求以控制性低強度材料（Controlled Low Strength Material； CLSM）回填。對於一般管路回填材料之充填性能及導熱性是否對電纜輸電容量造成影響，亦實值得探討。

日本 TOENEC 公司與中部電力等公司共同研發之推進管內低熱抵抗充填材(TC Grout)，以及美國 GEOTHERM 公司的流動性低熱抵抗充填材料(FTB)，具有高的流動性及自充填性，較一般管路回填材料有更低的熱抵抗及較佳之熱穩定特性，有助於解決一般管溝回填材料熱抵抗過高的問題，提升管路內電纜之送電容量及送電安全。

國外對於低熱抵抗管路回填材料之研發及應用已有數十年的經驗。本次到日本 TOENEC 公司研習以及參加由美國 POWER DELIVERY CONSULTANTS (PDC) 公司所舉辦的電力傳輸及低熱阻回填材料相關課程，其對國外在電纜管路或推進管內之低熱抵抗充填材料之特性及使用方式進行瞭解，並汲取設計與施工相關經驗，將有助於本公司之電纜管路工程之設計與施工，以及電纜線路之運轉安全。

二、過程

(一) 行程

本次赴日本及美國研習，時間自 101 年 10 月 1 日至 101 年 11 月 11 日，共計 43 天。

1、101 年 10 月 1 日至 101 年 10 月 12 日：

至日本 TOENEC 公司研習推進管內低熱阻抗充填材 (TC-GROUT) 之使用，主要目的為了解 TC-GROUT 之材料成份與特性，以及在日本使用狀況。研習期間並拜訪中部電力公司白金調整所，參觀其 2500 mm² 充油電纜線路洞道間接水冷系統，及了解其電纜管路充填材料之使用情形。

2、101 年 10 月 13 日~101 年 11 月 11 日：

至美國佛羅里達州聖彼德斯堡，參加美國電力傳輸顧問公司 (Power Delivery Consultants Inc.) 所舉辦的 2012 年電力傳輸課程，該研習課程主要內容包括架空與地下電纜輸電線路之設計及施工實務、提升輸電線送電容量相關技術、探討土壤熱阻性質對送電容量之影響，以及電纜管溝流動性低熱阻抗回填材 (Fluidized Thermal Backfill; FTB) 之使用等相關議題，對於提升輸電線路之設計與施工相關知能，有很大助益。

(二) 參程機構及人員：

1、日本 TOENEC 公司；

配電本部地中線部長 水野朝之先生、副部長 潼本嗣久先生、營業管理部部長 深川
広則先生、副長 寺嶋篤美先生及原美穗小姐。

2、日本中部電力公司：

工務技術中心技術部門主任 吉村貴広先生、專門副長 熊澤昌宏先生。

3、美國 Power Delivery Consultants Inc.：

Dr. Dale A. Douglass (Principle Engineer)、Dr. James R. Steward、Mr. Eriks
V. Surmanis (Senior Engineer)、Mr. Jay A. Williams (principle engineer)、
Dr. George J. Anders (Anders Consulting Ltd.)

(三) 研習機構簡介：

1、日本 TOENEC 公司

TOENEC 公司屬中部電力公司集團下之工程公司，事業領域包括：電力供給設備建造、電氣設備建造、資訊及通信設備建造、空調衛生設備建造。總部位於日本愛知縣名古屋市。公司創立於 1944 年，資本額 76 億 8000 萬日元，員工人數約 4984 人。除各地分支機構外，總公司包括配電本部、情報通信本部及營業本部。本次研習參訪之部門為配電本部下之地中線部。

2、Power Delivery Consultants, Inc.：

PDC 公司為位於美國紐約的一家電力傳輸工程顧問公司，主要提供架空線、地下電纜及電力變壓器等方面的技術諮詢及服務。

該公司擁有在輸電工程技術與經驗豐富的專家，並與電力領域有特殊專長的學者與顧問們合作，提供電力工業領域之專門技術諮詢與服務，服務領域包括線路初步規劃、細部設計、研究分析、架空線與地下電纜線路額定容量評估與提升、電磁場分析、電纜強制冷卻系統計算、運轉與維護之準備與訓練，以及著重實務經驗的教育訓練課程。

PDC 公司並與 GEOTHERM 公司合作，提供地下電纜路徑之熱阻抗量測及流動性低熱阻回填材 **FTB** 之設計及相關技術與諮詢服務。

貳、研習內容

一、日本推進管內低熱阻抗充填材（TC-Grout）之材料特性及使用

（一）、TC-Grout 開發背景

在日本，電纜推進管與電纜管路之間的空隙以充填材料填塞，其主要目的是防止萬一管道壁受損時，砂土進入管道內損壞電纜管線及造成地面塌陷;其次是用以固定電纜管路，以利電纜佈設。

以往，日本通常使用灰泥(mortar)材料(以下稱發泡砂漿;air mortar)，作為推進管路的充填材，材料主要成分為水泥、水、瓷土（Porcelain clay）及發泡劑。該材料容易取得且成本低，空氣含量約 50%，可充填於較長距離之電纜推進管。

然而，曾經在線路重載情況下，發生推進管內電纜絕緣破壞事故。經調查，事故電纜曾於異常高溫下運轉。進一步檢視發現，事故點位於洞道上方的空隙處，管路充填材料已剝離。值得注意的是，電纜周圍的充填材料已變乾、碎化並且充滿空隙。經測量管路充填材料-發泡砂漿(air mortar)之熱阻係數高達 $16^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ ，比一般土壤熱阻係數(約 $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$)高出很多。

最後確認電纜事故發生原因，是因為電纜推進管內所使用的充填材料-發泡砂漿(air mortar)的高熱阻抗，限制了電纜的散熱，致電纜於異常高溫下運轉，最終造成絕緣破壞。為改善以前推進管內使用發泡砂漿(air mortar)高熱阻率、低充填性的缺點，於是有了新的導熱充填材料 **TC-Grout** 的研發。

(二)、 充填材料之熱阻抗對電纜導體溫度的影響:

圖 1 為洞道內電纜熱阻抗與溫度之關係圖。圖中假設輸電電纜在重載下(即事故發生時)之單位長度發熱量為 30W/m 、地面基底溫度為 25°C 。由圖示可知，當土壤及管路充填材之熱阻率為 $1^\circ\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ 時，電纜被覆與地面溫度差為 15°C ，導體溫度僅 70°C ；但如果土壤及管路充填材之熱阻率增高為 $10^\circ\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ 時，則電纜被覆與地面溫度差將增高至 150°C ，導體溫度則高達 205°C 。

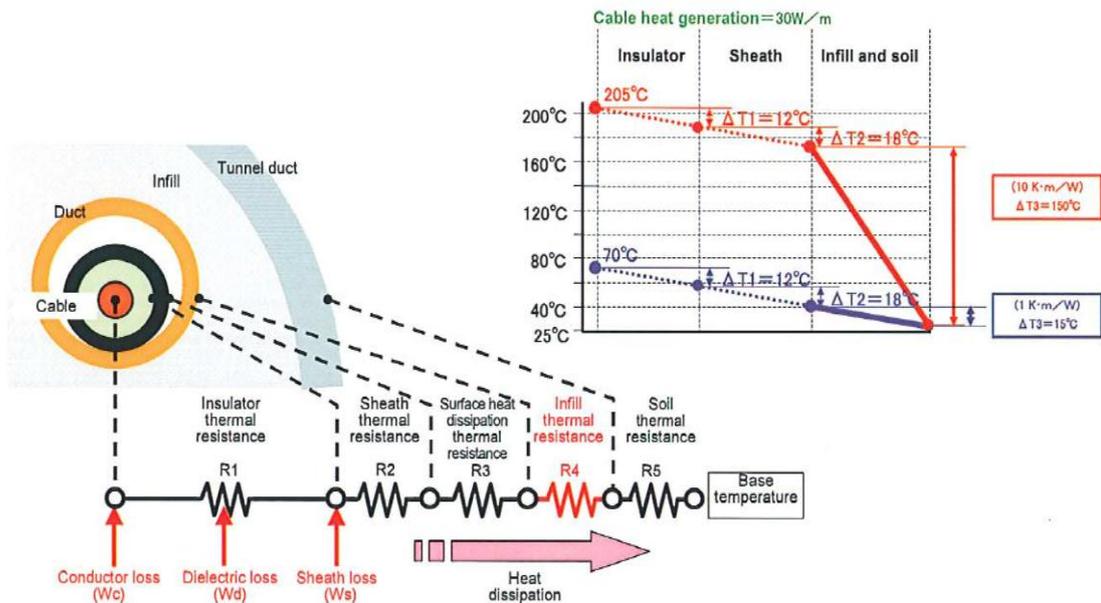


圖 1 洞道電纜熱阻抗與溫度關係圖〔2〕

由上述說明可以了解，電纜管路充填材料及土壤的熱阻，對電纜的散熱有很大的影響。若熱阻抗值太高，將導致電纜導體於異常高溫下運轉，致絕緣破壞事故發生。

(三)、TC-Grout 之材料組成及特性

日本 TC-Grout 之開發，主要針對以往使用發泡砂漿(air mortar)之高熱阻抗缺點加以改善，TC-Grout 具有較佳的低熱阻抗值，並維持高流動性質及體積收縮率，以利於長距離電纜推進管之充填，而且具有適當的抗壓強度。

TC-Grout 的主要組成成分為普通水泥、炭酸鈣(MP Grout)、水及流動劑。材料拌合比例如表 1 所示，其中 MP Grout 主要成分為灰石(CaCO₃)，其配比為專利。

TC-Grout 之材料特性如表 2 所。

表 1 TC-Grout 材料組成比例 (每 m³) :

水泥	炭酸鈣 (MP Grout)	水	流動劑
300kg	1200kg	455kg	5.5kg

表 2 TC-Grout 之材料特性:

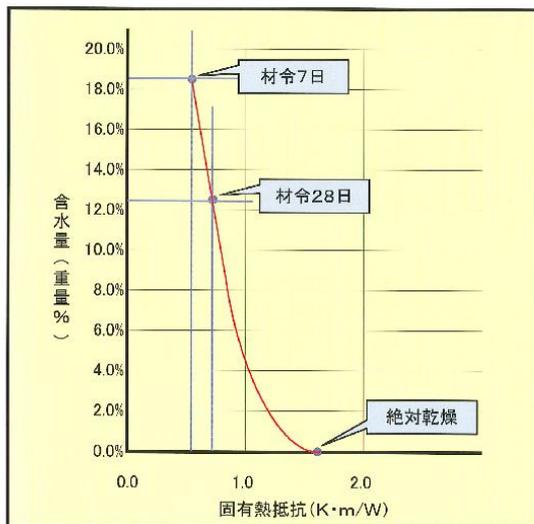
g 值	流動值*	比重*	浮水率*	抗壓強度(28 天)
0.7~1.7 °C-m/W	350~450 mm	1.96 g/cc	1 %	約 7N/mm ²

*施工品質管控項目

1、g 值(固有熱阻抗值或熱阻率)

充填材料之 g 值越低，則熱傳導效果越佳。日本以前於電纜推進管內所使用的發

泡砂漿(air mortar)，其 g 值高達 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ ，造成電纜散熱困難，因而造成電纜的絕緣破壞。TC-Grout 之 g 值，在乾燥前為 $0.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ ，完全乾燥時為 $1.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ 。其含水率與熱阻率之關係如圖 2 所示。表 3 為各種材料的 g 值(熱阻率)，圖 3 為 g 值(熱阻率)之量測情形。



資料	材令7日	材令28日	絕對乾燥
含水量(重量%)	18.5	12.6	0
固有熱抵抗(K·m/W)	0.6	0.7	1.7

表 3 各種材料 g 值 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$)

材料	g value
混凝土	100
TC grout	70~170
水	170
Air mortar	500~1,000
空氣	~4,500

圖 2 TC-Grout 含水率與熱阻率關係圖〔4〕，7 日固有熱阻抗為 $0.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ ，完全乾燥下為 $1.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$



圖 3 熱傳導率測量〔4〕(非定常熱線法)

2、壓送能力

推進管內充填充材料須具有高的流動性及良好的壓送特性，才不會在推進管內灌注後，在管道內產生任何空隙。

以前日本所使用的發泡砂漿，其組成材料為水泥、水、砂及空氣，並以發泡劑來減低密度，並當作潤滑用，雖可增加其壓送能力，其壓送距離可達 450m，但因該材料含有太多空氣(空氣量約高達 50%)，故熱阻值很高，阻礙了電纜的散熱。故 TC-Grout 摻以減水劑 (water reducing agent) 來減輕比重及增加流動性。

如圖 4 所示，TC-Grout 以流動值(flow value) 來檢視其流動性是否符合要求，流動值標準約 350~450 mm，可壓送約 400m 以上距離 (Φ50 mm管)。



圖 4 流動值測定，流動值品管標準 350~450mm

3、充填能力

填充材料通常都會加入水，當填充材料填入推進管內，凝固過程中因水份上浮於

洞道上方，蒸發後將造成氣隙。由於管道內若有空隙將不利於電纜的散熱，為了達到良好的充填特性，TC-Grout 之充填率須控制在 99% 以上，即材料之浮水率（或體積收縮率）須小於 1%。如圖 5 所示為量測 TC-Grout 充填 24 小時後體積變化的情形。



圖 5 填充材料體積變化測量，於灌注 24 小時後之浮水率須 $<1\%$

(四)、低熱阻抗充填材（TC-Grout）之使用

如及 T-PFP 管線配置情形。TC-Grout 的成分配比為固定，可於施工現場拌料，或以預拌車送抵工地，但須於 1 個半小時內完成澆置。倘應用於斜坡地形，則須於底部加裝支持裝置，如圖 7 所示。

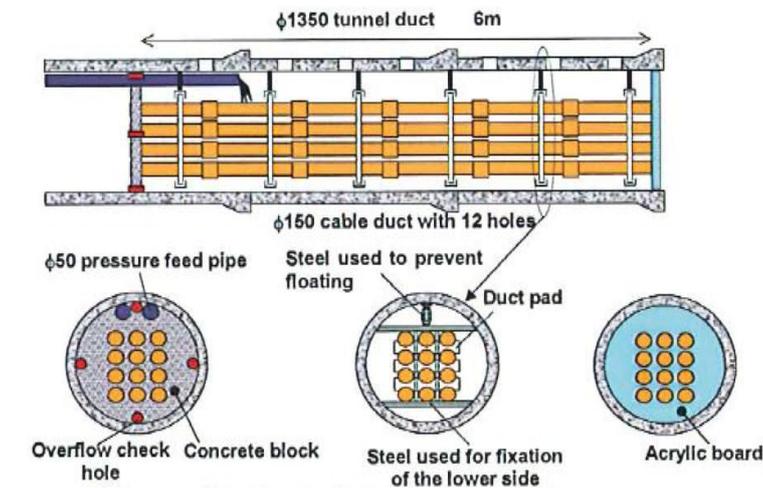


圖 6 TC-Grout 推進管充填測試全尺寸圖〔2〕

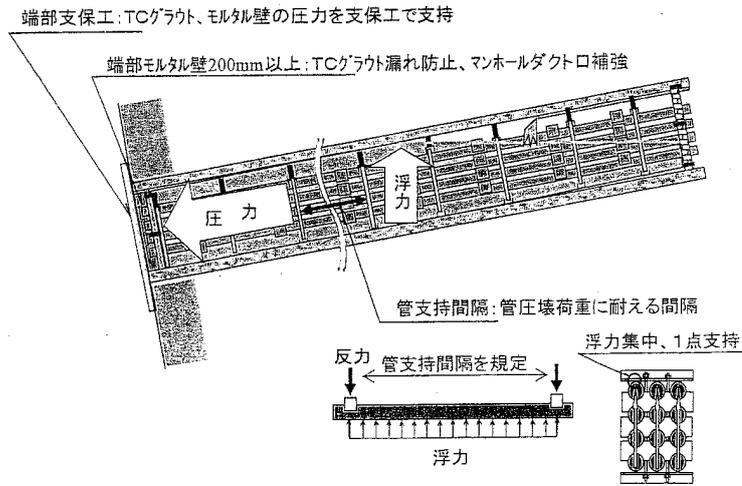


圖 7 應用推進管於斜坡地形，加裝底部支持裝置圖

圖 8 為 TC-Grout 之材料充填測試，可注意到推進管（ $\Phi 135\text{ cm}$ ）上方 TC-Grout 凝固後之空隙很小（ $< 1\text{ cm}$ ）。



圖 8 TC-Grout 材料充填測試，充填性良好，推管上方空隙很小， $< 1\text{ cm}$

表 4 為 TC-Grout 充填實績一覽表，於平成 18~23 年(2006~2011 年)間共 33 個施工地點，總充填量計 1734.6 m³。

表 4 TC-Grout 充填實績一覽表(平成 18~23 年)

期間	電力公司	現場數	充填量 m ³	%
H18.11~H23.7	中部電株式會社	25 處	555.4 m ³	32%
H20.9~H21.2	東北電株式會社	7 處	705.0 m ³	41%
H21.6~H21.7	東京電株式會社	1 處	474.2 m ³	27%
合計		33 處	1734.6 m ³	100%

二、土壤熱性質 (thermal property) 與電纜送電容量

(一)、影響土壤熱阻率之因素

名詞解釋：

1、熱傳導係數 (thermal conductivity) K：

或稱導熱率，為在單位溫差下，單位時間內通過單位面積 x 單位距離的熱量熱導率 $k = (Q/t) * L / (A * T)$ ，單位： $W / ^\circ C \cdot m$ 。

2、熱阻係數(Thermal resistivity) ρ ：或稱熱阻率，為導熱率的倒數，單位： $^\circ C \cdot m / W$

3、熱阻抗(Thermal resistance) R：

代表一物體阻止熱流通過的能力，計算方式為物體之兩面間溫差除以通過的熱流功率， $R = T / (Q/t) = L / (kA)$ ，單位： $^\circ C / W$

電纜送電容量取決於導體的運轉溫度，影響電纜導體散熱路徑之熱阻抗包括絕緣體、被覆、管路及土壤 (earth) 等，其中以土壤之熱阻抗的變化最大，對電纜散熱之影響也最大。沿著電纜施設路徑不同地點之土壤熱阻率變化可達到 5 倍之多，即使在同一地點，因含水量不同，土壤熱阻值之變化量可達 2 倍以上。

土壤熱阻率的大小，主要視土壤組成、構造、水份含量、乾密度、周圍溫度等因素而定，其中，以水分含量對土壤熱阻率的影響最大，密度次之。

由於電纜產生的熱流，主要是靠土壤粒子與粒子間的接觸，以傳導的方式傳遞到地表。其次則是藉由土壤粒子間的水份及空隙，以傳導及對流的方式傳遞熱量。如圖

9.a 所示，若土壤粒徑大小一致，則能供熱量傳導之接觸點少，故不易導熱，所以熱阻係數較高。如圖 9.b，當土壤由不同大小之粒子組成，粒徑分佈良好(well graded)，則粒子間的空隙少，可供導熱的接觸點多，故有較低之熱阻係數。

土壤熱阻率越低，表示對電纜的熱傳導性越好。土壤熱阻率變化範圍可能在 30~500 °C-cm/W，而特別設計的填充材料之熱阻率可在 30~120 °C-cm/W。

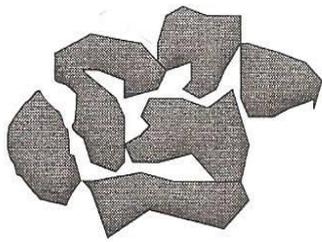


圖 9.a 土壤粒徑一致，熱阻率較高

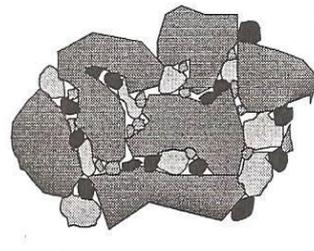


圖 9.b 土壤粒子間的空隙少，熱阻率較低

如圖 10.a 所示，高含水量的土壤因能提供較佳之熱傳導路徑，故其熱阻率較低，而當土壤變乾時（如圖 10.b），因熱傳導路徑變的不連續，故熱阻率較高。表 5 為各種土壤之乾熱阻係數。

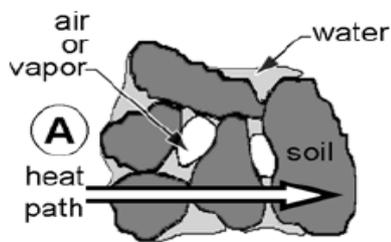


圖 10.a [9] 土壤含水量高，熱阻率較低

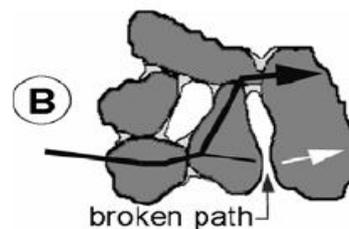


圖 10.b [9] 土壤變乾，熱傳導路不連續，熱阻率較高

表 5 各種土壤之乾熱阻係數。

土壤粒子		其他	
種類	熱阻係數	種類	熱阻係數
石英	12	冰	45
花崗石	30	水	165
灰石	40	有機物	~500
砂岩	50	石油	~800
頁岩	60	空氣	~4500
頁岩 (易碎)	200		
雲母	170		

有關土壤熱阻率之研究，研究〔6〕分析沃土 (loam)、石英及有機物在不同密度及含水率下對土壤熱阻係數之關係，如圖 11 及圖 12 所示，顯示土壤熱阻率隨著密度以及含水率的增加而降低。研究中指出：1.有機材料不適合當電纜管路回填材料。因為不論如何壓縮，增加其材料密度，熱阻率仍然很高。2.乾燥、粒狀的材料，即使在壓密後，其熱阻抗值仍高，亦非理想的電纜管線回填材料。3. 氣隙阻礙熱的流動，所以即使如石英之熱阻係數(0.1°C-m/W)比沃土(0.4°C-m/W)低上 4 倍，但在相同密度下，其熱阻值却差不多。

對於粒徑大小差不多的材料，靠壓實來增加密度因只能達到一定程度，故提高導熱性的效果有限。不靠壓實，而能有效提高材料密度而的作法，是將小粒徑加到較大粒徑的空隙中，使材料粒徑分佈良好 (Well-Graded)，達到降低熱阻率的效果。其研究結論：

1、為利電纜設計及施工安全，應須知道土壤及回填材料之熱性質，否則將無法

確保所假定的土壤熱阻率 0.9°C-m/W(註:本公司假定土壤熱阻率 1.0 °C-m/W)

是否安全。

- 2、含水率與密度對土壤熱阻率的大小有決定性的影響，所以回填材料設計的密度應予規範，且須能確保其含水量不要在臨界含水率以下。
- 3、土壤若有種植樹木，其密度較低且水份變化大，故其熱阻率通常會很高。

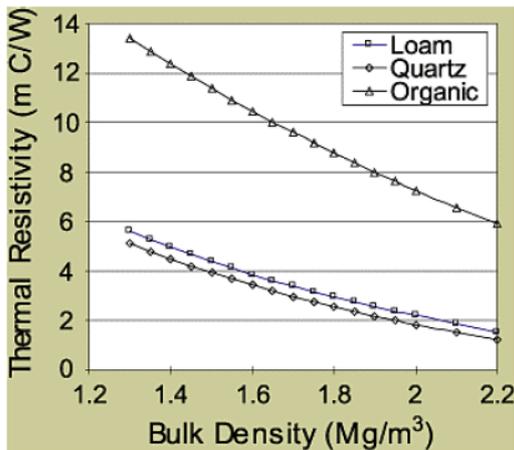


圖 11 土壤熱阻率與密度關係圖〔6〕
密度越高，土壤熱阻率越低

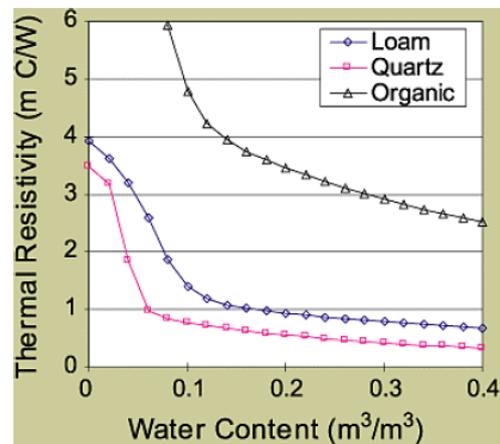


圖 12 土壤熱阻率與含水量關係圖〔6〕
含水量越高，土壤熱阻率越低

(二) 臨界含水率與熱穩定性

當土壤之含水率在臨界點(臨界含水率; critical moisture content)以上，土壤之熱阻率變化很小，即水份下降尚不致於造成熱阻太大改變，但當含水率降至臨界含水率以下，則土壤熱阻將隨著含水率減少而急劇升高。

熱穩定性 (Thermal Stability) 為一種概念，用以說明當土壤因電纜送電而受熱時，其熱阻率是否能維持在一定程度上能力，以免電纜運轉溫度超過其安

全值。

因為電纜有電流通過，產生之熱損致溫度上升，將使得週圍的土壤水分散失，若土壤含水率仍維持在臨界含水率（critical moisture content）以上，則土壤之毛細作用仍可使土壤吸附足夠水份，土壤之熱阻值能維持相對穩定。但當土壤含水率低於臨界含水率以下時，則土壤因電纜的加熱下繼續變乾，致熱阻升高，使得電纜溫度更高，導致土壤更多的水份被帶走，如此惡性循環（thermal runaway），最終將使土壤完全變乾，致電纜運轉超過溫度限制，造成絕緣破壞事故發生。

如圖 13 所示，為各種土壤與 FTB 之含水率對熱阻係數之關係圖（Thermal Dryout Curve）。由 Thermal Dryout Curve 可了解土壤之熱穩定性。土壤具有熱穩定性，表示土壤不容易變乾，在其含水量低於臨界含水率以前，仍可回復到應有的濕度。好的回填材料，其臨界含水率應很低，且完全乾燥時之熱阻率很小。圖中 FTB 之臨界含水率約僅 2~3%，完全乾燥下之熱阻率小於 $90^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$ ，熱穩定性良好。

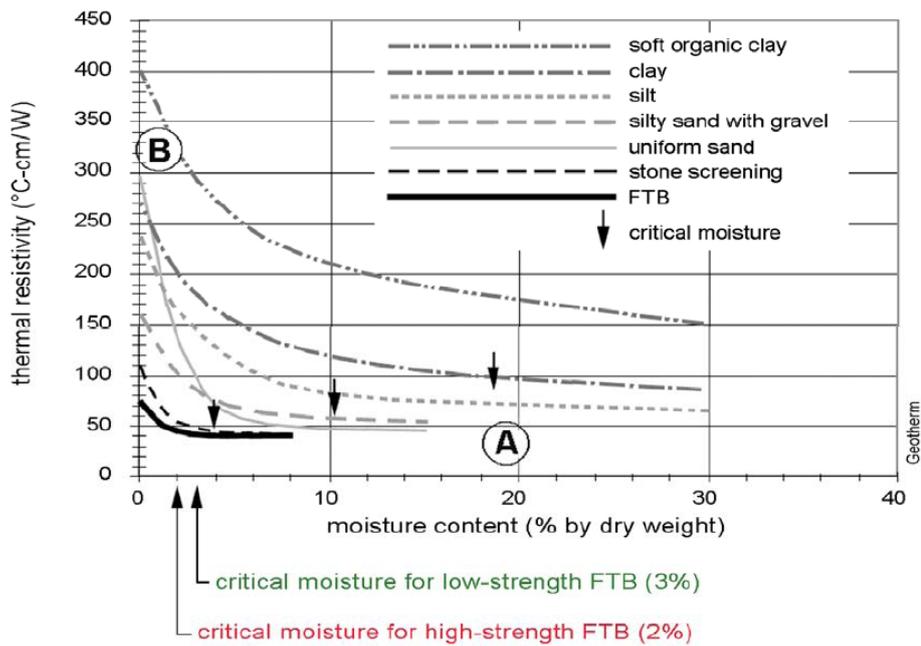


圖 13 各種土壤以及 FTB 之含水量對熱阻之關係圖〔10〕 (Thermal Dryout Curve)

(三)、土壤熱阻率調查

土壤熱阻在所有電纜熱阻中所佔的成分最大也最不確定，在計算電纜送電容量時，就應掌握電纜設置路徑之土壤熱性質，以利正確評估電纜送電容量。

由於土壤固有熱阻抗值會隨氣候、環境狀況或因電纜送電後的加熱作用，因水份的變化而改變。因此在計算電纜容量時，須考慮土壤在可能發生最乾燥情況下的熱阻值做為送電容量計算依據。

若缺乏相關資料，一般多假設土壤熱阻值在 90~120°C-cm/W（本公司取 100°C-cm/W）。但由許多案例顯示，假定值可能與現場實際情況有很大差異，若估計有誤，線路長期於重負載下運轉，將會造成送電容量不足問題。所以，如同塔基

設計須進行鑽探以掌握地質狀況，電纜路徑沿線之土壤熱阻調查及測量有其必要性。

美國電力公司於線路初步規劃階段，通常會收集土壤相關資料，如參考附近之塔基，或其他事業單位已建立之地質資料，以決定進行土壤熱阻測量的位置及數量。

通常，土壤鑽探及取樣時，會取每公里 2 處進行。注意勘測深度須涵蓋到電纜埋設深度，若土壤性質變化較大，則會增加探測的次數。

有關土壤熱阻的量測方式，可參照 IEEE 標準(IEEE-442)或 ICC 指導方針施作。

在 GEOTHERM 公司為美國紐約馬爾他變電所一條 115Kv 地下電纜所做的土壤熱阻調查案例中〔10〕，熱阻抗測定之地點，配合客戶要求共擇訂 9 處，測量深度約 3~9 呎深。檢測方式主要分為二部份：一、現場熱阻測量及取樣。二、試驗室測試。

由現場測試得到測試當時之土壤熱阻值，現場取樣的土壤樣本，再經試驗室做土壤類型、乾密度、水含量及熱阻抗測量，並將土壤試體加熱至完全乾燥時，以得到含水率對熱阻率之關係圖(thermal dryout curve)，如圖 14 所示。

土壤含水率對熱阻率之關係曲線圖，可以用來了解電纜設置地點之土壤熱性質及檢視設計條件之適當性。若設計採用之熱阻值（即預期最低濕度下之熱阻率）是落在臨界含水率以上的平緩區域，則表示在一般負載狀態下，土壤受熱後之熱阻仍將維持穩定，亦即以該熱阻值計算電纜容量是沒問題的。反之，若預期最低

濕度之熱阻值落在臨界含水率以下的不穩定區域，則表示靠近電纜周圍的土壤可能會因電纜送電後加熱而加速變乾。此時就須考慮採用改良用的導熱回填材料 (corrective thermal backfill) 如 FTB，來改善土壤之熱阻特性，降低土壤固有熱阻抗之影響。

根據該土壤熱阻調查結果顯示，電纜設施路徑中之土壤類型可分成三類，如圖 14 所示，其中以細砂土最為乾燥（濕度約 6~9%）為最有可能發生乾化的土壤類型。特別是在夏季季末時，很容易因電纜的加熱作用，使濕度低於 6%，則熱阻抗值將達 100°C-cm/W 以上。該細砂土之臨界含水率約在 8~9%，在臨界含水率以下之土壤會熱不穩定(thermally unstable)，若沒有用混凝土或充填低熱阻抗材料加以改善，則當完全乾燥時，其熱阻將達到 300°C-cm/W。

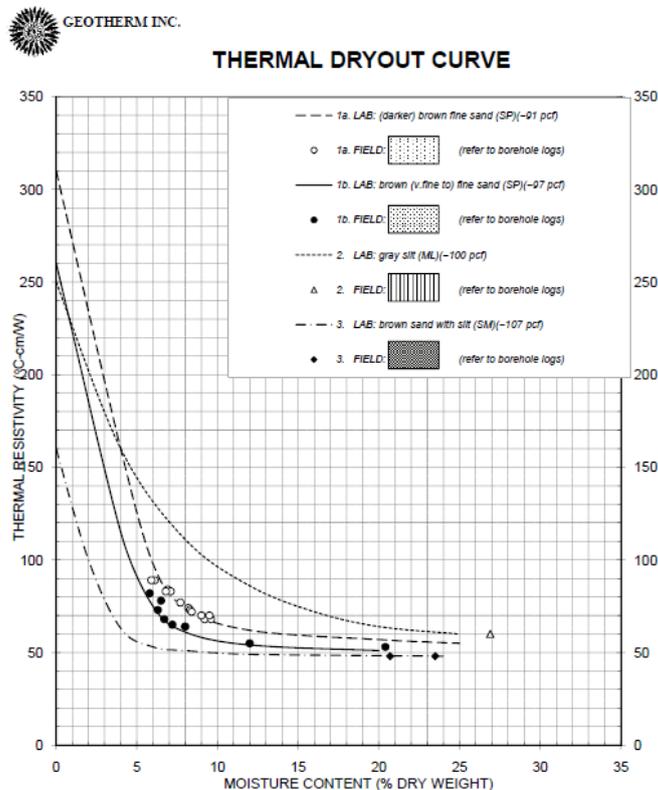


圖 14 紐約馬爾他變電所 115Kv 電纜路徑土壤含水率對熱阻率關係圖 [10]

(四)、土壤熱阻抗對電纜送電容量的影響

影響電纜送電容量之因素包括導體種類及尺寸絕緣體種類導體容許最大溫度、土壤溫度、被覆接地方式、電纜回線及相間距離、埋設深度、土壤及管路充填材料之熱阻等。

若電纜埋設深度越深，則電纜與地表間之熱阻抗越大，電纜送電容量會降低（註：超過 20 英尺後，深度的影響將逐漸變小）；因空氣之熱阻係數很高（約 4000 °C-cm/W），電纜管路內之空隙若有充填低熱阻係數材料，送電容量將可提升。不同的土壤成份及含水率，會有不同土壤特性及熱阻係數，對於電纜之散熱及送電容量有很大的影響。

土壤熱阻係數越高，電纜送電容量將降低。土壤熱穩定性若不佳（如黏土之熱穩定性很差），雖不會對電纜送電容量直接產生影響，但長時間於重負載運轉下，將會導致電纜異常溫升及額定問題。由於土壤固有熱阻抗難以改變，為達到預期的送電容量，新設電纜線路可藉由充填特殊設計的低熱阻回填材料來降低電纜的總熱阻抗。

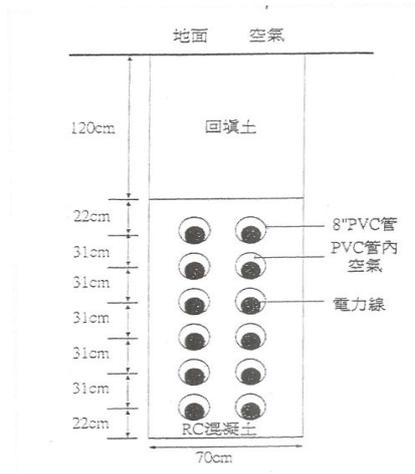
有關土壤熱阻率對電纜送電容量之影響，於本公司地下電纜多回線管路共設時之送電容量研究〔16〕中，以 FLUX2D 模擬 161KV 多回線電纜管路，於不同土壤導熱係數下之導體送電容量與導體最高溫度。研究顯示：

1、在導體最高運轉溫度限制下(90°C)，土壤導熱係數越低（即熱阻係數越高），

則送電容量越低。

2、在額定送電電流下，土壤導熱係數越低（即熱阻係數越高），則導體運轉溫度越高）。

如圖 15 所示，為 161KV 4 回線（12 PVC 管）配置。如圖 16 所示，在導體最高運轉溫度 90°C 時，當土壤導熱係數為 1.043W/m°C，則電纜最大送電電流為 1059A;若導熱係數降至 0.704 W/m°C（即熱阻係數增至 1.42 °Cm/W），則最大送電電流將降至 928A（約少 12%）。（註：該研究中設混凝土層導熱係數 1.2W/m°C）



如圖 17 所示，當導體在額定送電電流(964A)

下，若土壤導熱係數為 1.0432W/m°C 時，電纜導體溫度約 79.7°C；同樣送電電流（964A），當土壤導熱係數降至 0.704 W/m°C 時，導體溫度將達 94.7°C（溫差約 15°C）。

圖 15 161KV 4 回線（12 PVC 管）配置

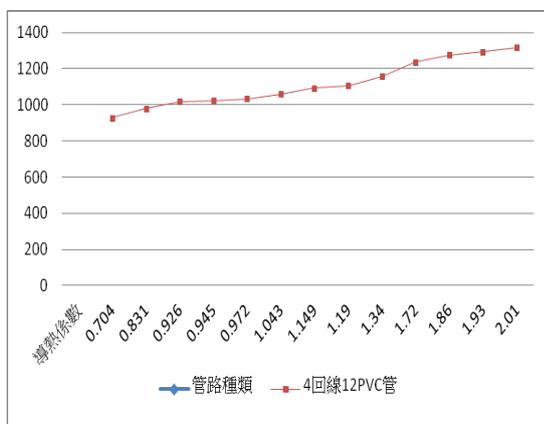


圖 16 土壤導熱係數與送電容量關係圖

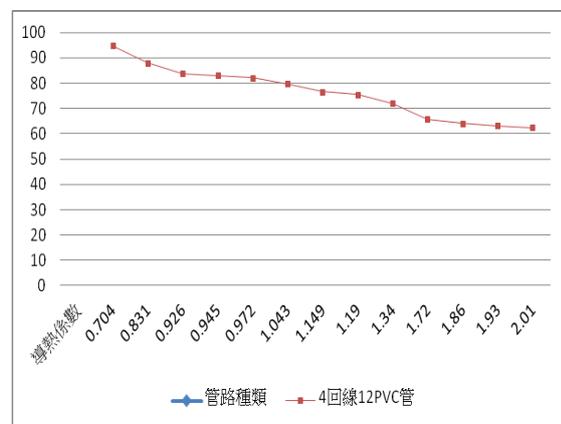


圖 17 土壤導熱係數與導體溫度關係圖

於流動性低熱阻回填材料 (Fluidized Thermal Backfill ; FTB) 使用於 3000MCM 138KV HPFF 電纜管溝案例〔8〕，FTB (熱阻率 50°C-cm/W) 用以改善原土壤固有熱阻率抗過高，電纜送電容量不足的問題。如圖 18 所示，可發現，隨著土壤固有熱阻增加，電纜管溝有充填控制性低熱阻回填材 FTB 之電纜送電流較未充填 FTB 者高。

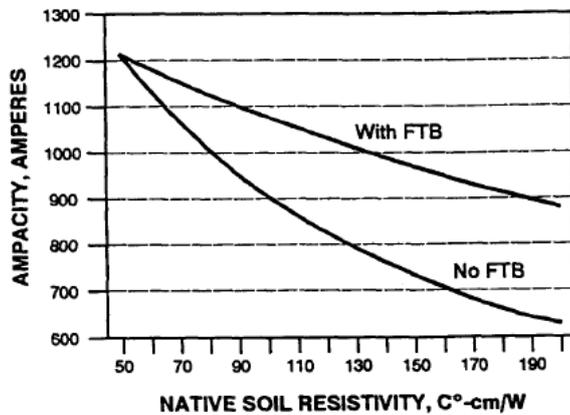


圖 18 土壤導熱係數與送電容量關係圖〔8〕，FTB 使用於 3000MCM 138KV HPFF 電纜管溝，提升送電容量。

三、低熱阻抗充填材料相關研究

- (一)、 1979 年南斯拉夫貝爾格勒電力公司委託 “Nokola Tesla ” 電力研究所進行的 110 kV 地下電纜路徑之土壤熱性質長期調查研究〔11〕，發現位於電纜線路中的幾處 “熱點”，其電纜表面溫度高於正常濕度下土壤溫度數 10 度 (°C)，

並確認電纜發生異常高溫，是由於電纜週圍土壤乾化導致的結果。

在輸電電纜發生異常過熱處，常可發現電纜週圍土壤變乾的情形，由於土壤變乾，使得熱阻抗增加，因而造成電纜溫度異常過熱。根據該公司的經驗，這些線路上的熱點將形成電力輸送的瓶頸點，若沒有加以處置，電纜過熱最終將導致電纜絕緣破壞，電纜事故的發生。

經過長期的實地調查及實驗分析後，“Nokola Tesla”電力研究所開發出特別混合的電纜管溝回填材料，並建議貝爾格勒電力公司使用於其 110 kV 地下電纜管路。該公司於 1985 年開始廣泛採用，填充於既有線路中已存的在熱點以及新設電纜線路潛在熱點，以改善土壤之熱穩定性以及降低電纜線路“熱點”之溫度。

經後續調查確認成效良好，故採用正確的低熱阻回填材料能有效降低土壤乾化，防止電纜溫度異常上升所造成的不良後果。

(二)、 預埋管路式電纜相較於直埋式電纜，有較不易被挖損易於維護的優點，但由於管路與電纜間存有空隙，熱阻較高，不易散熱，故管路式電纜之送電容量較直埋式電纜低。

為了提升管路式電纜之送電容量，中國大陸武漢高壓研究所研發出低熱阻凝膠材料 (gel)，其為凝膠、水、砂、水泥及摻料等混合而成的導熱充填材料，可灌注於電纜管路的空隙內，增加管路的散熱效果。該研究以 38 公尺長，110KV

400 mm²的電力電纜（3 相水平排列）做模擬，研究結果顯示：

- 1、.管路式電纜的送電容量比直埋式電纜之送電容量低約 8.5% 。
- 2、在管路內充填導熱凝膠充填材料後，則其送電容量提升，約比直埋式電纜之送電容量低 4.10% 。
- 3、管路內有填充導熱材料比沒有填充者之送電容量高約 4.9% 。

中國學者 Dr. Zheng 等人的後續研究〔12〕，則發展出有限差分法對水平排列的電纜做電腦模擬分析，研究結果指出：

- 1、當電纜管路中的空隙充填熱導材料，將使單回線中的電纜容量提升約 5.6% ，或者，相同負載下，溫度可降低約 7 度。此乃因為管路內灌注熱導材料，將有助於電纜產生的熱量傳遞到外部土壤中，故能提升電纜之容量。
- 2、若為降低成本，僅中間相填充導熱材，其他旁邊二相填充一般土壤時，亦可達到不錯的效果。
- 3、當管路電纜回線數越多時，則電纜管路填充熱導材料對於提升電纜送電容量之效果將降低。此乃由於多回線電纜間熱量交互影響，阻礙了熱量之傳遞。

（三）、由於地下電纜使用的回填材料之熱性質會影響電纜的送電容量，若回填材料之含水率喪失，電纜周圍之區域將變乾致熱阻增加，影響送電容量，而有些土壤其水份喪失的速度會比其他種類的土壤還來的快。

在埃及 Mr. Gouda 〔13〕等人對於使用人造回填材料的研究中，則希望從

沙子、石灰石、黏土等不同組成之 9 種天然及人造的土壤樣本中，找出最適合電纜管線回填之材料配比，以提升電纜容量。經實驗測試後發現，75% 的砂及 25% 的石灰石所組成的土壤之熱性質最好，在乾燥情況下，其土壤熱阻率為 $1.304^{\circ}\text{C m/W}$ ，在潮濕情況下其土壤熱阻率為 $0.522^{\circ}\text{C-cm/W}$ 。

另外，埃及 Alexandria 配電公司，關於地下電纜填充材料之研究〔14〕中，探討不同類型土壤之熱阻特性，研究指出：

- 1、潮濕的沙子其熱阻率很低（ $55\sim 105^{\circ}\text{C cm/W}$ ），是很好的電纜回填材料，但砂子在乾燥時有很大的熱阻（ 310°C cm/W ）。在氣候乾燥的地方，因為沙子無法保持水份，故很容易因電纜送電加熱後，因水份喪失致熱阻率變得相當高，故不適合做為電纜管溝之回填材。
- 2、石灰石在乾燥時是很好的電纜管路填充材料，輕度壓實的石灰石，其熱阻率約僅 $24\sim 32^{\circ}\text{C cm/W}$ ，但石灰石不可用於濕冷的地方，因為濕冷環境的土壤會變酸，土壤中的酸性會和石灰石起化學變化。

（四）、土壤的熱阻抗值及熱穩定性會影響電纜的送電容量，事實上，有關電纜管線低熱阻回填材料之使用及相關研究，早在 60 年代就引起廣泛的重視。

Mr. Baljet 等人針對電纜管溝填充材料之熱性質研究中〔15〕，試圖分析當地可供作電纜管線填充材料的熱性質，以確認其適用性。該研究團隊測試了壓碎石 (crushed stone screenings)、人造沙 (manufactured sand) 以及均質沙 (uniform

sand) 之熱阻率以及其材料密度對含水率的關係。文中指出，由於均質沙的多孔特性，使其水份無法保持，故當氣候變乾燥時（特別是在低密度下），含水量低於某一程度以下，其熱阻將急劇升高。此一現象，在該長期研究所做的實地量測結果（1962年12月~1963年12月），可得到印證。研究結果指出：

- 1、壓碎石（crushed stone screenings）與人造砂，因粒徑分佈良好，孔隙很小，熱阻抗值很低，在潮濕及乾燥情況下，均有良好的熱性質。
- 2、但當地的均質砂(uniform sand)，因粒徑大小一致，熱阻率高，且旱季時因水份遷移之影響，故熱性質不穩定。由熱阻率與土壤含水率以及密度之關係圖可看出，當土壤濕度低至某程度（臨界含水率）以下時，土壤熱阻將急劇升高。而且由於土壤熱阻率的大小亦與土壤密度有很大關係，土壤熱阻率最小值正好發生在其密度最大處。

由於壓碎石（crushed stone screenings）具有優異的熱性質，最後為當地 Ontario 水力公司用於高壓電纜埋設管之充填。

註：1、人造沙（manufactured soil）為一粒徑分佈良好的電纜管線填充材，最大粒徑為 1/4”。

2、本地沙：為 Ontario 水力公司過去用以回填電纜管溝的均質細砂。

3、壓碎石：可由多數之碎石場供應，粒徑分佈良好，最大粒徑為 1/4”。

四、流動性低熱阻回填材（FTB）之材料特性組成

FTB (Fluidized Thermal Backfill) 為具低熱阻率及高流動性之電纜管路回填材料，其主要組成成份為砂、碎石、水泥、水及流動劑，基本上是以低強度的混凝土再摻入流動劑，使其能在電纜管路間流動，於硬化後形成良好的導熱介質。

FTB 使用的材料，主要是視施工當地砂石場或混凝土預拌場，可取得的材料而定，尤其是在骨材(aggregate)方面。FTB 之組成成份及混合比例須經實驗室測試後才確定，以達到低熱阻率及熱穩定性、流動及抗壓強度之要求。所以 FTB 可說是依據施工當地可取得之混料，針對客戶需求而設計混料配比之產品。

如表 6 及表 7 所示，分別為美國西亞圖城市照明公司 FTB 之材料設計與測試標準〔9〕。該 FTB 材料設計配合現場需求可分為高強度 FTB 與低強度 FTB，其中低強度 FTB(抗壓強度約 250psi)，主要用於一般電纜管溝充填，高強度 FTB 抗壓強度可達 3000 psi，可用於重要電纜之管線充填及保護，因其密度更高，其導熱性效果比低強度者佳。

表 6 西亞圖城市照明公司混料設計

成份	低強度 FTB	低強度 FTB
中粒料來源	DuPont Pit #B-335	DuPont Pit #B-335
中粒料數量(lbs/cu yd)	1800	1700
細粒料來源	DuPont 採石場 #B-335	DuPont 採石場 #B-335
細粒料數量(lbs/cu yd)	1400	1350
中/細粒料比例	1.286	1.259
流動劑	飛灰	飛灰
流動劑數量(lbs/cu yd)	280	100
水泥(lbs/cu yd)	35	520
水(lbs/cu yd)	305	360

表 7 西亞圖城市照明公司 FTB 混料設計與現場測試標準

準則	單位	低強度 FTB		高強度 FTB		測試方法
		材料設計	現場測試	材料設計	現場測試	
熱阻係數 最大值 (0% 含水率)	°C - cm/W	100	110	75	75	SCL-Approved Consultant
熱阻係數 最大值 (臨界含水率)	°C - cm/W	70	80	60	65	SCL-Approved Consultant
最小 28 天 抗壓強度	lbs/sq in	none	none	3000	3000	ASTM C39-05
最大 28 天 抗壓強度	lbs/sq in	100	150	none	none	ASTM C39-05
最小 乾密度	lbs/cu ft	130	130	136	136	ASTM C39-05
最小坍度	in	6	6	5	5	ASTM C143-05
最大坍度	in	9	9	9	9	ASTM C143-05

其中低強度 FTB 在臨界含水量(2%)時之混料設計熱阻率須低於 70°C -cm/W。現場測試之熱阻率須低於 80°C -cm/W；高強度 FTB 在臨界含水量(3%)時之混料設計熱阻率須低於 60°C -cm/W。現場測試之熱阻率須低於 60°C -cm/W。

表中各項數據為最低要求，承攬廠商均須依所設計之材料配比及規範進行拌製，並於熱阻抗及相關特性測試合乎規範後才可澆置於現場。另混料設計之熱阻率較現場測試之熱阻率嚴格，主要考慮 FTB 在批量製造時可預期的變異。

FTB 具有低熱阻率及熱穩定性，其熱阻率依不同之材料組成而異。在一般含水率下，熱阻係數約 35~45°C cm/W，在完全乾燥下熱阻係數約 65~100°C cm/W。

通常，在現場 FTB 之含水率很難低於 2%以下，故 FTB 最大熱阻值約在 40~50°C cm/W，PDC 公司則在設計階段採用較保守的 60°C cm/W 來計算電纜送電容量。

如前所述，FTB 可依現場需求分為低強度與高強度 FTB，低強度 FTB 抗壓強度約在 100~250psi，可方便日後搶修時以手工具開挖，若為保護重要電纜，可調整水泥及水的含量以提高強度，高強度 FTB 之抗強度可達 3000 psi。

FTB 具有高流動性（坍度約大於 9"），灌注時不須搗實，即可充填於狹窄的電纜管溝、管線密佈的管路及小尺寸的電纜洞道內。若充填於斜坡時，可調整其材料混合比率，以降低其流動性（坍度約 3~4 英吋），此時為確保 FTB 均能灌注於孔隙間，就可能須要施以輕微的振動。

FTB 可由一般預拌混凝土車運送到施工現場灌注（自拌合到充填時間須小於 1.5 小時），使用一般設備可壓送 150m 以上之距離。若使用特殊設備可壓送更長

的距離。其固化時間短，約灌注隔天即可回復路面使用。

五、流動性低熱阻回填材（FTB）之使用

電纜送電容量受到埋設週圍之土壤熱性質（thermal properties）影響很大，由於電纜導體所產生之熱量係經由絕緣層電纜管道及週圍之土壤散逸到地表，如果土壤固有熱阻抗過高，為了能達到預期的送電容量，防止固有土壤之熱不穩定情形發生，高壓電纜管線會採用特殊的管路回填材料來改善。

本次研習之低熱阻抗管路回填材料 FTB，具有低且穩定之熱阻抗特性，由於其熱性質較一般土壤更不易受到含水率降低的影響，可大幅降低因土壤濕氣遷移（moisture migration）所導致的熱不穩定（thermal instability），故對於改善電纜路徑中之潛在熱點有很大助益，可提升地下電纜管路之散熱效能。

FTB 使用於高壓地下電纜工程案例：

（一）、紐州長島南部電纜計畫〔16〕：

該工程包括一條 345KV 地下電纜線路，線路長度約 41 公里，其中陸上地下電纜約 30km，多埋設於人口密集的市區及交通繁忙之道路下方（約 1.5 公尺），因受施工時間及空間限制，為達到預期送電容量及解決電纜路徑中潛在之熱點，電纜管溝需填充特別設計的導熱回填材料。

經調查結果，電纜施設路徑沿線之路基材料及砂土呈半乾燥狀態，實地測量結果熱阻抗值約 60~150°C cm/W。因缺少適合的回填材料以及因受場地限制無法大量囤積及壓實回填的砂石，故該工程設計以 FTB 做為電纜管路回填材料。

本案 FTB 回填材料設計，在完全乾燥下之熱阻抗值為 100°C cm/W，於一般運轉情況下，可提供穩定的熱阻值為 50°C -cm/W。抗壓強度可達 28 天 50p.s.i. (350kp)。

由圖 19 為固有土壤及 FTB 在不同含水率下之熱阻率之關係圖，可看出 FTB 在散熱效能及熱穩定性方面比固有土壤有更佳表現。

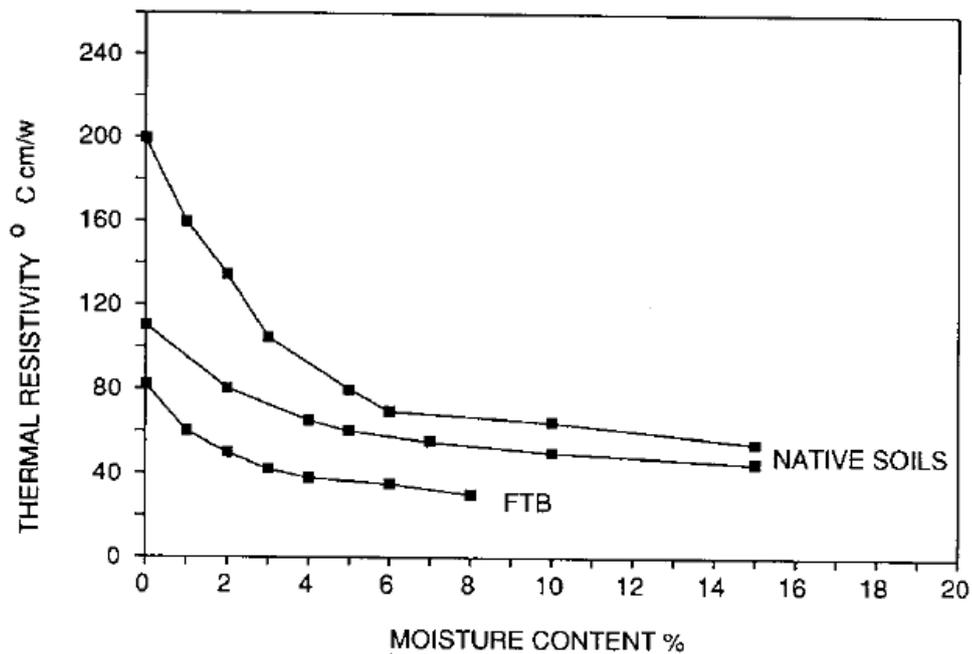


圖 19 固有土壤及 FTB 在不同含水率下之熱阻率之關係圖 [16]

(二)、夏威夷壇香山阿契爾 138Kv 電纜線路〔8〕：

由夏威夷電力公司興建的 138Kv 管路式電纜線路，長度約 5 km。經由 Geotherm 公司所做的土壤熱阻調查結果，發現電纜路徑中有些區段是鬆散的黑色熔岩餘燼，其熱阻抗值高達約 200~250°C -cm/W，已無法達到初期送電電流及終期更高電流的要求。

因此，該電纜線路必須以具低熱阻抗及熱穩定性的管路填充材來改善。FTB 被選用於該計劃。由於當地可取得的砂石粒料若未經過特別的混合及組成，是無法達到所要求的熱阻特性。經嚐試多種配比及實驗室測試，包括在粒料中混合不同比率的水泥以及使用或不使用流動劑，才確認該計畫中 FTB 所使用的混料規格。

由當地提供的砂石材料為：碎石，最大粒徑為 1 英吋，由砂石場提供；玄武岩混凝土砂（#4 篩析）、較細的碎石（#4 篩析）。選用的混料包括 65 kg/m³ #4 骨材，56 kg/m³ 普通水泥（ASTM C-150）及 351 l/m³ 水，流動劑在該工程並未使用。

前述由實驗室測試所找出的 FTB 最佳組成比例，再經現場測試，必要時再調整其混合比例以及水份含量，以符合現場使用狀況。

小結：

- 1、 地下電纜之送電容量受回填材料之影響很大。若土壤固有熱阻過大，為達到設計負載需求及解決電纜中潛在之熱點問題，在地下電纜設計及施工時，應適當選用具低熱阻抗及熱穩定性之回填材料。
- 2、 FTB 之粒料以施工當地可取得之砂石材料為主，其設計配比經實驗室測試與現場測試調整後，最後得到流動性、強度及熱阻特性能符合需求的最要配比。
- 3、 不論是哪任何回填材料，材料混合及充填之施工品質管控很重要，初期施工品質管控若不好的負面效應，在初期負載低的情況下可能不會立即顯現，但當線路長期於重負載下運轉時，將會有額定問題產生。回填材料的施工品質管控項目，至少應包括材料規格及配比、密度、水份含量、熱阻抗值、流度及抗壓強度等。

參、心得及建議

- 一、日本以往使用發泡砂漿充填電纜推進管，因未考量材料充填性及導熱性質，致發生電纜事故。目前中部電力公司電纜推進管均改用導熱性較佳之 TC-Grout 充填。故對於電纜推進管內充填材料之選擇，除了材料須具有高流動性及自充填率外，充填材料的導熱特性熱穩定性亦須良好（具低熱阻率）。
- 二、本公司目前以強度 175 kg/cm^2 之混凝土作為電纜推進管之充填材料。一般而言，混凝土具低熱阻係數，但若要充填於長距離推進管時，則其流動性及充填率是須注意的問題。由於流動性及充填率不佳或體積收縮率太大，澆置後很容易在推進管內造成空隙。因空氣之熱阻係數極高，將不利電纜散熱，降低電纜送電容量。故對於充填於電纜推進管之混凝土，其設計配比、流動性、填充性、澆置方式及施工品質管控須能確實掌握，否則，若填充效果不佳，推進管內之熱阻可能高於預期，將影響原設計送電容量。此外，巨積混凝土之水合作用產生之高溫，是否會造成 PVC 管變形的問題也須注意。
- 三、不論電纜管溝以何種導熱材料充填，材料之配比及施工品質之管控是十分重要的一環，若施工品質不佳，回填材料之熱阻率將無法符合原先設計要求，其負面影響雖在初期線路負載低時不會立即顯現，但日後若線路長期於重負載下運轉，將發生電纜導體異常高溫及電纜額定問題。

四、目前本公司在計算電纜送電容量時，係直接參照 IEC-60287-3 所列之熱阻係數平均值，均假定土壤熱阻抗值為（ $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ ），並未考慮不同土壤類型及含水量下之熱阻率差異。雖然電纜沿線之土壤平均熱阻率可能仍在假定值以下，但若其中有部分區段之熱阻率過高，亦將造成送電之瓶頸點，限制整體之送電容量。

五、美國電力公司在規劃地下電纜線路時，通常會先收集施設路徑之土壤特性資料或實施土壤熱阻調查，在掌握土壤之熱阻及特性後，再據以評估電纜送電容量，此設計理念值得學習。以設計觀點，由於土壤之熱阻率及熱穩定性會影響電纜之散熱效能及送電電流大小，若能對電纜施設路徑之土壤性質有所瞭解，將有助於正確掌握電纜應有的送電容量，不會造成電纜送電容量過於低估或高估的情形。

六、近年來，由於熱阻抗測量裝置及技術的發展，已提升對土壤熱性質之掌握。當電纜施設部分區段之土壤熱阻值高於原先設計之預估值時（如本公司假設土壤固有熱阻抗為 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ ），為達到原先設計的電纜送電容量，則該瓶頸點(或潛在熱點)之電纜管溝可以低熱阻抗回填材料充填，以提升電纜管路散熱效能，降低土壤固有熱阻抗過高的不利影響。

七、控制性低強度材料（Controlled Low Strength Material； CLSM），具有高流動性及低強度性質，目前適用於各型構造物之基礎回填及道路各種管溝之開挖回填。

以土木施工而言，其流動性佳，不須施以振動搗實就可以填滿管溝空隙，且因

強度低，方便日後挖掘搶修，所以適合一般管路回填。然回填材料之密度過低、孔隙太多，將不利於電纜散熱。故 CLSM 低強度的鬆散漿體結構，是否會對電纜散熱造成影響，實值得進一步探討。對於目前使用於電纜管路之 CLSM 回填材料之熱阻率及熱性質的了解，建議可作為後續研究的目標。

肆、参考文献

- 〔1〕.滝本 嗣久 ,石曾根 剛 “ケーブル布設用推進管内の充填材「TC グラウト」の開発,” 株式会社トーエネック,中部電力株式会
- 〔2〕.Yoshinari NISHIYAMA,Hironon MASHIMA,Makoto UESAWA,Hiroshi SAITO, Takeshi ISHIZONE,Satoshi MIZUNO, “DEVELOPMENT ON THE MORTAR MATERIAL FOR CABLE SYSTEMS IN A DIRECTIONAL DRILLING,” TONENC Corporation , CHUBU Electric Power Co.
- 〔3〕.真島弦憲,“推進管内低熱抵抗充填材 (TC グラウト) の開発,” 中部電力株式会社
- 〔4〕.株式会社トーエネック,中部電力株式会社,” ケーブル推進管用中詰充填材「TC グラウト」”, JSTT 発表会 (TC グラウト) REV2 簡報資料,2012 年 10 月
- 〔5〕.Power Delievery Consultants , Inc , “Power Cable Ratings and Soil Considerations 課程講義,” November,2012
- 〔6〕.Gaylon S. Campbell, Keith L. Bristow, “Underground Power Cable Installations : Soil Thermal Resistivity,” Decagon Devices Inc., CSIRO Land and Water
- 〔7〕.Deepak Parmar and Jan Steinmanis, “Underground Cables Need a Proper Burial,” Geotherm Inc.,2003

- [8] .Jay A. Williams, Deepak Parmar, Mark W. Conroy, “CONTROLLED BACKFILL OPTIMIZATION TO ACHIEVE HIGH AMPACITIES ON TRANSMISSION CABLES,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.1, January 1994
- [9] .Seattle City Light , “MATERIAL STANDARD-FLUIDIZED THERMAL BACKFILL,” Standard number : 7150.00,2008
- [10] .GEOTHERM INC., “SOIL THERMAL SURVEY ,LUTHER FOREST TECHNICAL CAMPUS, 115 kV UNDERGROUND CABLES, MALTA,NEW YORK,” SEPTEMBER 2008
- [11] .M R Sredojevie, R M Naumov, D P Popovic, M D Simic, “LONG TERM INVESTIGATION OF THERMAL BEHAVIOUR OF 110 Kv UNDERGROUND TRANSMISSION LINES IN THE BELGRADE AREA,” CIRED 97,2-5 June 1997,Conference Publication No.438
- [12] .Zheng Liang-hua,Lu Zhi-wei, Ma Weiping,Yu Jian-li , “Research on Increasing Cable Current-rating by Pumping Thermal Material into Pipes,” 2010 International Conference on Power System Technology
- [13] .Ossama E. Gouda, Adel Z. El Dein, Ghada M. Amer, “Improving the Under-Ground Cables Ampacity by using Artificial Backfill Materials,” Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conferenee, Cairo University, Egypt, December 2010
- [14] .Abdul Hamid ELBAKLY, “NEW BACKFILLING MATERIAL FOR UNDERGROUND POWER

- CABLE,” CIRED, 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-5 May 2003
- 〔 15 〕 .JOHN I. ADAMS, AN TOM F. BALJET, “The Thermal Behavior of Cable Backfill Materials,” IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS-87, NO.4, APRIL 1968
- 〔 16 〕 .H.S,Radahakrishna, D.Parmar, “FLUIDIZED THERMAL BACKFILL FOR HIGH VOLTAGE UNDERGROUND TRANSMISSION CABLES,” GEOTHERM INC.
- 〔 17 〕 .許進富，林俊宏，古家豪，吳正雄，張文曜，“輸電地下電纜多回線管路共設時之送電容量研究期末報告”，國立臺灣科技大學電機工程系，台灣電力公司綜合研究所，中華民國 93 年 3 月
- 〔 18 〕 .J. H. NEHER, M. H. McGRATH, “The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems,”
- 〔 19 〕 .Internation Standard IEC 60287-3-1, Electric cables-Calculation of the current rating, Part3: Sections on operating conditions reference operating conditions and selection of cable type
- 〔 20 〕 .真島弘憲，上澤誠，石曾根剛，水野賢，“推進管内低熱抵抗充填材の開発”，H19 電氣学会 B 部門大会