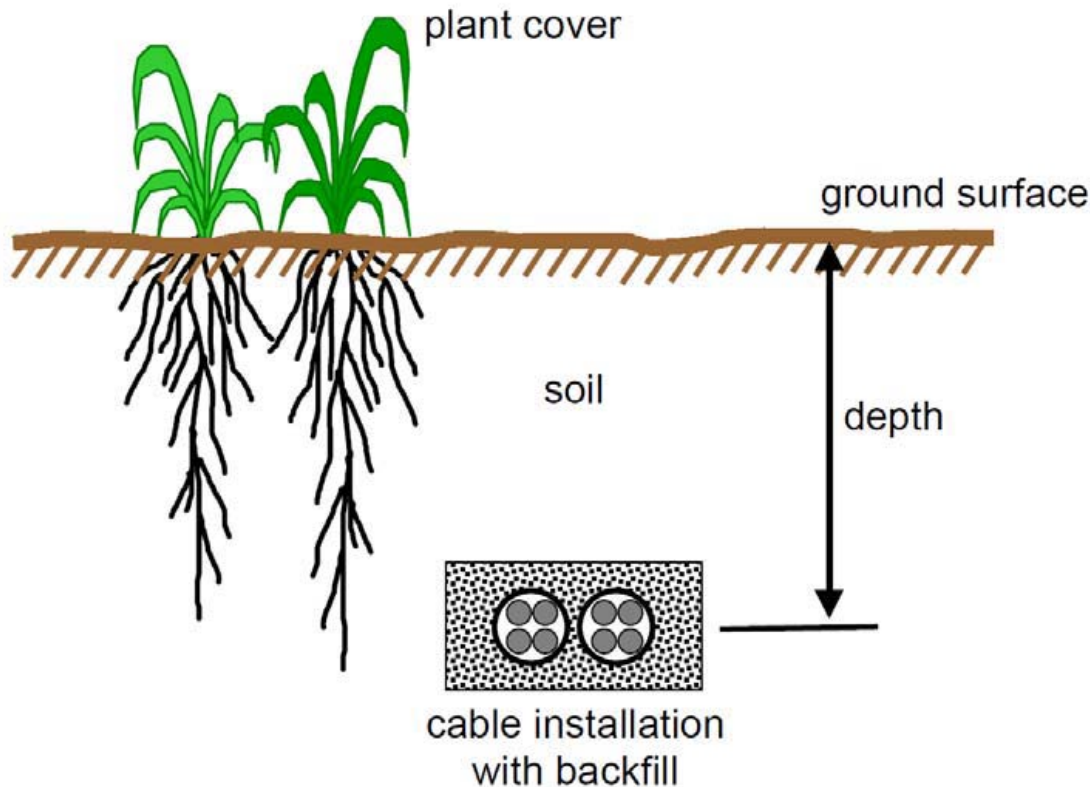


地下電力ケーブル設置に関わる土壌熱抵抗の効果

The Effect of Soil Thermal Resistivity (RHO) on Underground Power Cable Installations

Gaylon S. Campbell, Keith L. Bristow



Plant cover : 植被、Ground surface : 地表面、Soil : 土壌、Depth : 深度、Cable installation with backfill : 埋め戻し材によるケーブル設置

「電力エンジニアが土壌物理学の専門家でもなければならぬ」と考えている者はいないだろう。しかし、こういった知識は、地下の電力送配電システムの設計及び実装でますます重要となっている。問題は実にシンプルで、導体内の電気の流れが熱を発生させることである。ケーブルと周囲環境との熱フローに対する抵抗は、ケーブルの温度を上昇させる。温度がある程度増加することはケーブル設計の範囲内であるが、想定以上の温度はケーブルの寿命を縮める。高くなり過ぎると、1998年のニュージーランドのオークランドのケースのような甚大な事故につながる。土壌はケーブルと周囲環境との熱流路である。したがって、熱抵抗の一部を形性する

ため土壌の熱特性は全体設計の重要部分となる。地下ケーブルシステムを正しく設計するため必要な詳細算出は、60年以上にわたり知られている。一般的に使用される手順は、Neher と McGrath (1957) 及び最近では国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission 1982) で概説されている。これらの計算は手作業で行えるものだが、現在、ほとんどのエンジニアは、商業目的または自作のいずれかのコンピュータプログラムを使用している。計算は非常に詳細部分に及び、概ね音響物理学あるいは、人が土壌の知識を得るまでの経験論に基づくものである。それ故、選択された数値は暗闇で弾を撃ったようなものもある。土壌の熱抵抗で、

しかもよく設計されたシステムでさえ、全熱抵抗の半分以上を占める可能性があるため、エンジニアはケーブルやダクトを扱うのと同じように注意し扱わなければならない。

土壌の熱抵抗

土壌の熱抵抗を記述する適切な理論は、昔から存在する (de Vries, 1963, Campbell, Norman, 1998)。これらのモデルは誘電混合モデルに基づき、全体抵抗を構成成分抵抗の重み付けされた並列的組み合わせとして扱う。土壌の熱抵抗を決定するには5つの構成成分が重要である。それは、抵抗値が上昇する順に、石英(ケイ砂)、他の土壌鉱物、水、有機物、そして空気であり、これらの実際値はそれぞれ0.1、0.4、1.7、4.0、40m C/Wである。実際の土壌や充填材料のこれらの重み付け係数を知らなくとも、次の4つのことは明白である。つまり、1) 空気はやっかいで、許容可能な低い熱抵抗の実現のためには、空隙を最小化するように密に充填されなければならない。2) 水と空気を交換すると多くのことができるが、水もそれでも良い導体とは言えない。3) 有機物はどんなに水分を含んでも高い抵抗値を示す。4) 石英(ケイ砂)を多く含む充填材料は最小抵抗値を示す(他の点は同じであるとしても)。これらの点について例を用いて説明する。

密度と熱抵抗

図1は、埋戻し材で許容し得る低い熱抵抗を得るために、いかに圧縮が重要かを示している。埋設ケーブルの計算では、土壌の熱抵抗値としてしばしば推定されるものは0.9 m C/Wである。図1では、このように低いものはない。植物の成長を維持する典型的な土壌密度は1.5 mg/m³程度であるが、そこではケイ砂土壌でさえこの推定値の4倍以上となる。図1からは3つの重要な点を観察することができる。第一に、有機材料はどれほど圧縮しても埋設ケーブルから熱を放散させるに適するものではない。第二に、乾燥した粒状材料の熱抵抗も、たとえ高密度で圧縮しても、埋設ケーブルには理想的なものとは言えない。第三に、空隙が熱の流れを制御する

ので、ケイ砂鉱物はローム鉱物に比較し4倍も低い抵抗値を示すに関わらず、この2つの全体抵抗は同密度でほぼ同じ値をとる。「任意の高密度が圧縮によってのみ得られるものではない」ということは言及する価値がある。均一な大きさの粒子を圧縮することで、与えられる最大の密度を獲得でき、粒子を壊すことなく、それ以上の密度を得るためには、粗い粒子の隙間に細かな粒子を加えることになる。それ故、高密度はよく類別された材料を使用することで得られる。

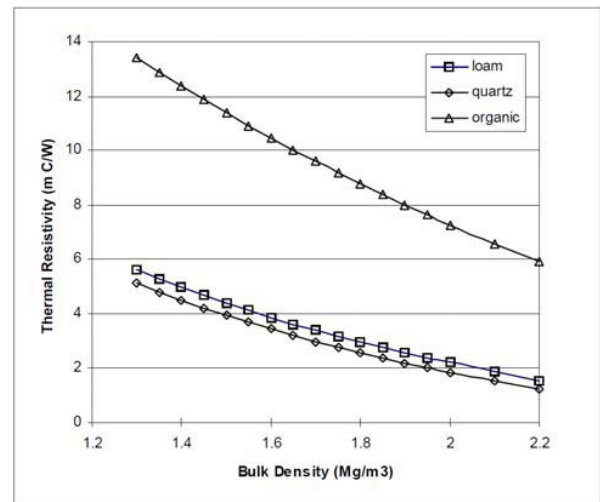


図1. 乾燥した多孔質材料の熱抵抗はその密度に大きく依存する。

Loam : ローム、quartz : 石英(ケイ砂)、organic : 有機物、
Thermal Resistivity(mC/W) : 熱抵抗、Bulk
Density(Mg/m³) : バルク密度

水分含量と熱抵抗

水の熱抵抗は土壌鉱物の抵抗より高いにも関わらず、それでも空気よりは低い。もし土壌の孔隙が空気ではなく水で満たされたならば、抵抗は減少する。図2では水の影響を示す。密度が図1の最も高い値よりも低い、1.6 mg/m³であっても、ほんの少しの水を加えるだけで、抵抗は1m C/W以下となる。孔隙にさらに水が加えられると、ケイ砂における効果はさらに強調される。有機物材料の抵抗は乾燥時よりはましだが、それでも埋設ケーブルに合理的な熱拡散を提供するには高過ぎる。

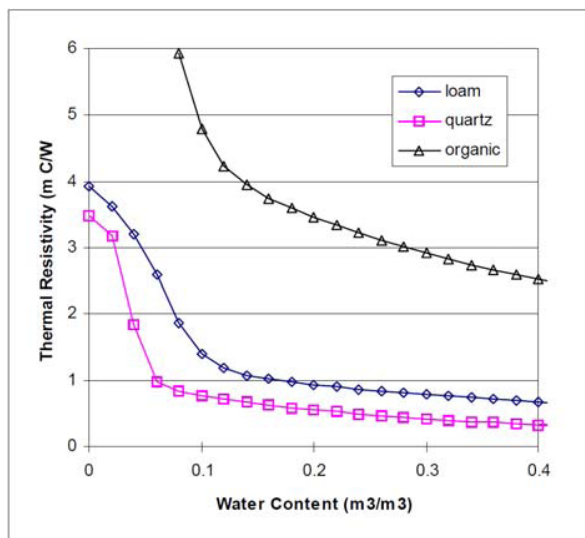


図2. 多孔質材料に水を加えることはその熱抵抗を大きく減少させる。

Loam : ローム、quartz : 石英 (ケイ砂)、organic : 有機物、
Thermal Resistivity(mC/W) : 熱抵抗、Water
Content(m³/m³) : 水分含量

フィールド内の水分含量

熱抵抗は水分含量で大きく変化し、土壤中の水分含量は変化するものなので、フィールドの土壤で期待される水分含量とは何かを尋ねることには意味がある。水面以下とそのわずかに上で、土壤は飽和している (全ての細孔が水で満たされた状態)。これらの状況でその土壤密度の抵抗は、考えられる最も低い値のままであろう。植物を成長させる根部分の最小水分含量は、砂の場合の0.05 m³/m³からより細かな組成土壤の0.10~15 m³/m³までの範囲にある。これらは、おおよそ図2で抵抗が劇的に増加し始める点の水分含量に対応している。これは限界水分含量と呼ばれ、水分が熱的に誘起され蒸気となる流れと、液体に還元される流れが平衡に達する温度の水分含量で、埋設ケーブルの設計で非常に重要なものである。なぜならば、ケーブルのまわりの土壤が乾燥してくると、ケーブルの熱が水分を移動させ、土壤の乾燥と熱抵抗の増加を引き起こす。すなわち、さらなる加熱を生じさせ、それがさらなる水分を移動させることになるため、結果として熱暴走という状態が生じる。

カスタマイズされた埋め戻し

特別に設計された埋め戻し材を使用して、図1に示されているものより低い乾燥抵抗を実現させることができる。流動埋め戻し材 (Fluidized Thermal Backfill™、FTB™) の注入である。それは約0.75 m C / Wの乾燥抵抗を持ち、湿った状態では0.5 m C / W以下まで下がる (詳細については<http://www.geotherm.net>) 。

測定

物理的特性から土壤の熱的特性を計算することが可能である一方、通常は計算よりも実際にその値を測定する方が容易である。様々な手法が ASTM (2008) 、IEEE (1992) によって示されている。広く受け入れられている手法は、線熱源を利用したものである。一般的に、電熱線と温度センサーは直径の30倍の長さを持ち、小口径ニードルに内蔵される。温度はニードルが熱せられている間モニターされる。この放射状熱フローシステムでは、定常状態を素早く確立し、温度と時間の対数をプロットする (直線的関係を得るため)。熱抵抗は直線の傾きに比例する。数社がフィールド及び実験室の熱抵抗測定に双方に適したツールを提供しており、ケーブルが設置され使用された後の熱的特性をモニターするために、プローブを適切な場所に備えることを可能にしている。

サイト固有の考慮事項

これまでに議論した課題に加え、地下の電力ケーブルを設計し設置する際に考慮すべきサイト固有の考慮事項がある。これらは設置の深さ及び設置の費用と熱的安定性の間でトレードオフな関係にある。ケーブルを深く埋めれば、熱的安定性は増す。これは浅い水面や毛管上昇が、ケーブルのまわりに相対的に湿気ある状態を作りだす状況の場合に特に当てはまる。

また、表面状態は土壤と大気すなわちケーブルのまわりの熱的環境の水分とエネルギーの交換に影響を与える。都市では表面が道路、建物、公園、庭園によって覆われる可能性が高い。一方で、農村では裸の土壤または植物

に覆われることが最も一般的である。表面状態とそこに横たわる熱的環境への影響を考慮することは、特に望ましくない結果を引き起こす可能性のある表面状態への変更にとり重要である。例えば、植生を追加することは、前述したような潜在的影響を伴って土壌の乾燥に大きく関わってくる。特に粘土質の土壌は、乾燥で亀裂が生じ、ケーブル周りにエアギャップが生じる。このような事態をさけるためにあらゆる努力を行わなければならない。ケーブルの設置を長期的に保証するためには、ケーブルの経路に沿った潜在的な"ホットスポット"（例えば水はけのよい砂状の土壌や乾燥につながる植生地域などのゾーン）に特別の注意を向ける必要がある。これらの課題のさらなる議論は次の URL を参照のこと（<http://www.thermalresistivity.com>）。

結論

電力エンジニアがこの短い議論から学び取るべき 5 つの重要なポイントがある。まず、安全で首尾よい地下電力ケーブルの設置のためには、土壌および熱戻り材の特性を知らなければならない。また、 0.9mC/W という値を安全に引き受けることはできない。第二に、密度と水分含量は熱抵抗率を決定するに重要な役割を果たす。埋め戻り材の密度を特定した上で、設計及び適切な管理を通して、水分含量がクリティカルレベル以下でないことを確認しなければならない。第三に、植物の成長を支える自然土壌は、低密度と変化的であり、また低い水分含量のため、工学的な材料よりも常に高い抵抗率を有する。第四に、すべての条件で十分な熱的性能を保證できる工学的な埋め戻り材が利用可能である。第五に、熱伝導率の測定は、フィールドにおいても実験室においても、比較的簡易なもので、ケーブル設計及び設置の一部とすべきである。最後に、ケーブル設置の深度、植生と土壌水分管理、そしてエアギャップを発生させ得る過度の乾燥と土壌亀裂の回避などのサイト固有の課題すべてが、地下電力ケーブルの設計と実装の際には考慮されなければならない。

References

ASTM (2008) Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. ASTM 5334-08

Campbell, G. S. and J. M. Norman (1998)
An Introduction to Environmental Biophysics. Springer Verlag, New York.

DeVries, D. A. (1963) Thermal properties of soils. in W. R. van Wijk, Physics of Plant Environment John Wiley, New York

IEEE (1992)
Guide for soil thermal resistivity measurements.
Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York.

International Electrotechnical Commission(1982)
Calculation of continuous current ratings of cables.
Publication 287, 2nd ed.

Neher, J. H. and M. H. McGrath. (1957)
The calculation of temperature rise and load capability of cable systems. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol.76

13943-01 ©2009 Decagon Devices, Inc. All rights