

土のなかの熱伝散と水分伝散

秋田大学鉱山学部 正員 色部 誠

電力中央研究所 正員 緒方 信英

1. まえがき. 最近超高压送電線の一部が地中に入れられつつあるが、管路式の場合、送電容量を支配する重要因子の一つは土の熱抵抗であるとされている。そのため、常温以上の土の熱特性を明らかにする必要性が生じてきている。熱抵抗とは $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ の単位をもつ量であって、これはある厚さの土の平均的な熱伝導率の逆数と考え得る量である。ところで、土は粒子の集りであって、そのあいだには空気も水分も含まれている。したがって、土中の熱の移動は単純な現象でないことはたしかである。土粒子から土粒子への熱の移動にともない、粒子間にある水分の一部は潜熱をうばって水蒸気となる。飽和水蒸気圧は温度の高いところでは高く、温度の低いところでは低いから、水蒸気はマクロには熱の流れと同一方向に移動する。温度の低いところでは、水蒸気は液化して潜熱を放出する。このようにして水分の移動によっても熱の移動が促進される。熱源のまわりの水分がすっかり移動してしまえば、あとに空隙が残る。空気は断熱材として効くから、水分をすっかり失った状態では土の熱伝導率は小さいはずである。このように考えただけでも土の熱特性がひかひかに複雑に変化し得るものであるかがわかる。熱抵抗の概念は包括的であって、以上のような現象を説明してくれるものではない。本報告は、2,3の砂のなかの熱伝導および水分伝散の数値によって比較し、かつ水分移動をともなう熱伝散について比較実験を行なった結果を示すものである。

2. 砂のなかの熱伝導. まず、砂粒子の間隙には水分がない状態と考える。このような砂粒子の集合体のなかでは熱は大部分粒子接触点あるいは接触面をとおして粒子から粒子へと伝わると思われる。もちろん、空気の対流による熱の移動、粒子表面からの熱輻射などおこしながら起っているが、これらは空隙径に依存し、前者は空隙径が 5mm より小さい多孔性物質には認め難く、後者は空隙径が 1mm 以下の多孔性物質では固体内の熱伝導に比し無視し得るとされている。よって、通常の砂ではこれらの影響はないものと考えてよさそうである。このような場合、砂のなかに熱源をある、それを一つひとつの肉じら面を考え、この面を境として内部と外部とに分けてみる。内部と外部との接触面積が同一であっても接触面要素の数が多いほど熱の流れに好都合なことはよく知られている事実である。よって、空隙率を小さくするような粒度配合であって、伯伯の粒子は角に富む砂ほど、乾燥状態で高い熱伝導率を示すことが想像できる。

つぎに粒子間隙に水と空気とが共存する砂を考える。水の熱伝導率は砂粒子の約 $1/10$ であるから、砂粒子をつなぐ水の膜・塊をとおしてかなりの熱の流れが考えられる。また、水塊の温度が上昇すれば、その自由面から序々に蒸発し、生じた水蒸気は飽和水蒸気圧の低い低温域へと空隙をとおって流れ、そこで凝結して水となる。水が気化すると高温域の熱をうばい、水蒸気が液化すると低温域へ熱を伝える。したがって、この場合の砂の熱伝導率は、完全乾燥状態のそれに比し、大まかに倍するはずである。

最後に、間隙が水で満たれた飽和状態を考える。水についても通常の砂のなかでは対流はないであろう。したがって、この場合、水圧勾配のない限り水分の移動は考えられない。しかし、空気に比べてはるかに熱伝導率の高い水が間隙を満たしている以上、この場合の砂は、第2の状態の砂に比し、大なる熱伝導率を有するものと考えることが出来る。図1はローム交りの石英砂について測定した熱伝導率である(文献^{*}1所載)。実線は間隙率70%、破線は30%のものである。この図より、間隙率の大小により、また間隙に含まれる水分の量により熱伝導率が敏感に変化するものであることがわかる。

熱伝導率は熱伝導率と容積比熱とをわった量である。砂の比熱は、当然、含水量の大きいほど大きい。したがって、含水量の変化に対して急激な変化はあり得ない。したがって、熱伝導率対含水量の曲線は図1の熱伝導率対含水量の曲線より緩やかな勾配の曲線が得られるものと想像される。しかし、いくつかの砂の熱伝導率の測定値は、水分の少ないあいだは熱伝導率と類似の

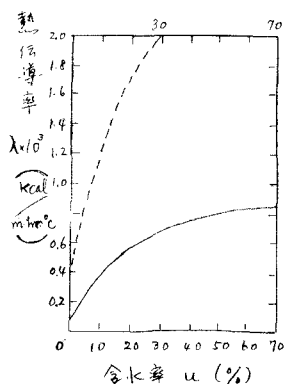


図-1

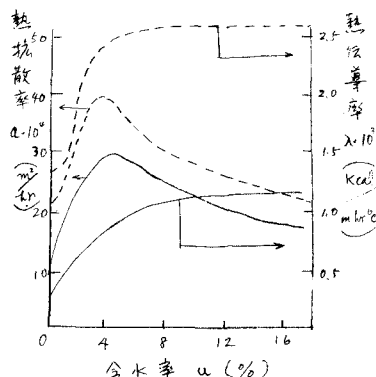


図-2

傾向をもって変化し、ある含水率で最大値を示し、さらに水分が増すに連れて減少する。図2はコ種砂の砂の熱伝導率および熱伝導率の測定結果である(文献¹所載)。ただし、実線は石英砂、破線は砂質ロームの値である。この2例の熱伝導率測定法は、恐らく t_0 の円筒供試体の外表面と t_1 ($t_0 > t_1$) に保ち、全体が t_1 になるまでの時間をはかって定めるものであると思われる。このような測定法によると、水分の少ないあいだは分子力作用によって水分移動がさまたげられ、熱伝導率も熱伝導率も水分の増大に対し同じような変化傾向を示す。しかしある程度をこえた含水量になると水分移動が活発になり、供試体内に水分勾配を生じ、低温部に水が集り、高温部の含水率は減少する。熱伝導率は、この状態を経て、供試体温度が一致になるまでの時間によって定められる。すでに高温部の含水率は減少しているため、その部分の熱伝導率は小さくなっていて、一致温度になるまでには長い時間を要することになる。その結果、熱伝導率は水分が増すとともに増大するにもかかわらず、熱伝導率はある含水率をこえると減少するものと考えられる。

同じ実験方法で、円筒中心部の温度の時間的変化を測定し、熱伝導率を算定すると、短時間の測定結果からは大なる値が、長時間の測定結果からは小さな値が得られる。このような差を生ずる原因も水分移動によって高温部の含水率が小さくなり、熱が移動しにくくなることにあると思われる。表1はこのような方法によっておめた石灰石砂、川砂①、川砂②、および軽石砂の熱伝導率である。

3. 砂のなかの水分移動。0°C以上の温度条件下では、多孔性物質のなかの水分移動は、液体水蒸気、分子の形で、現象的には毛管作用、蒸気拡散、分子拡散といった形式で進行する。水に飽

* 1. Luikov, A.V., Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies, Academic Press, New York, 1964.

表-1 砂の熱拡散率 (cm^2/hr)

材料	$t_0=40^\circ\text{C}$, $t_1=16^\circ\text{C}$		$t_0=60^\circ\text{C}$, $t_1=16^\circ\text{C}$		摘 要				
	15分	30分	15分	30分	湿潤密度	乾燥密度	含水比	最大粒径	均等係数
入石砂	15.50	13.84	20.95	17.34	2.025	1.99	0.89%	10.0 mm	15.0
川砂①	15.50	14.44	20.95	15.90	1.57	1.50	4.75	2.0	2.2
川砂②	15.18	12.66	15.72	14.60	1.47	1.37	7.32	4.9	2.5
野石砂	9.32	7.42	10.50	8.16	1.17	0.82	42.90	10.0	12.7

知されに状態にあれば、圧力勾配によって生ずる移動のみが考えられるが、平衡状態ではこれらの現象が同時に進行する。これらの現象を一括して水分拡散と呼ぶことが出来る。水分拡散は多孔性物質中に水分勾配があればかならず起る。

水分拡散率は一般に含水率および温度に依存する。含水率が小さく、主として分子拡散の形に移動が行われる範囲では水分拡散率は小さく、含水率の増大につれて水分移動が液体の形に行われるようになると水分拡散率は急激に増大する。

前記の川砂②について等温状態で水分拡散率を求めた結果を図-3に示す。比較例として石英砂(粒度配合、底面など不明)の水分拡散率を示せば、図-4のとおりである(文献1所載)。両図を比較し、川砂②のほうが石英砂よりオーダーにして一桁小さい。すなわち川砂②はこの石英砂に比し保水性の高いことがわかる。

水分拡散は、水分勾配がなるとも、前節で述べたように温度勾配のあるところにも起る。温度勾配によって起るこの水分拡散を熱水分拡散率という。熱水分拡散率と一般温度場における水分拡散率との比の値は0から0.2のあいだにあるといわれているが、熱水分拡散率の測定にはそのため精巧な装置を必要とするため、ここでは行なわなかった。

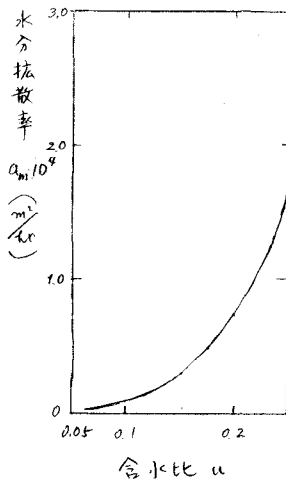


図-3 川砂②の水分拡散率

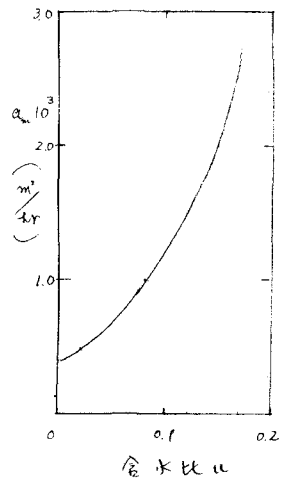


図-4 石英砂の水分拡散率

4. 砂中の熱・水分拡散実験 以上述べたように砂のなかに熱の移動・水分の移動は、砂の材質、粒度分布、密度、含水量によって左右される。ここでは、第2節に記した4種の砂を用いて、同一条件のもとで得られた含水状態(表-1にそのときの含水比が記入されている)で、同一の締め締め法によって高さ40cm、断面積 $45 \times 45 \text{ cm}^2$ の角柱試料をつくり、四側面を断熱材で囲み、底面を約 60°C に保ち、上面に水分の透散を防ぐため薄い合成樹脂板を敷き、 20°C の恒温室内に24時間おいて、いかなる温度分布、水分分布が得られるかを比較実験を行なってみる。図-5に実験結果を示す。

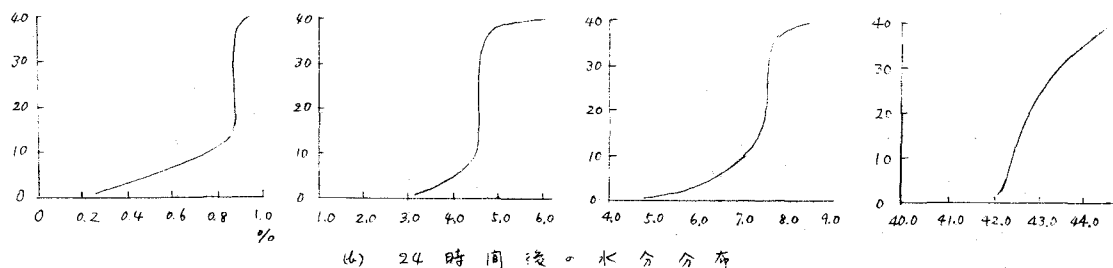
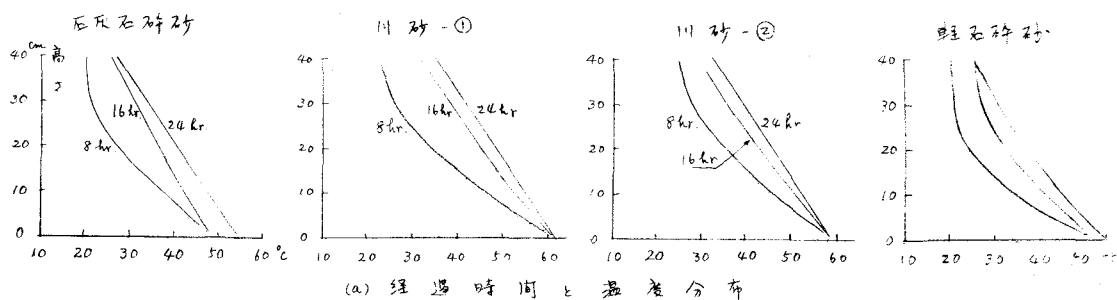


図-5 砂柱の熱・水分抗散実験結果

装置の調整に若干の手違いがあつたため、石灰石砂および軽石砂試料(底面)温度は 60°C に
 いならなかった。上図を見れば、軽石砂の場合、24時間を経過するころにはほぼ直線状の温度分
 布を呈している。もちろん、その勾配にはとんど差はない。円筒試体による熱伝散率測定結果
 の表1に見られるように、中心温度と表面温度との差が小さいほど、すなわち温度勾配が小さいほど
 どの材料も熱伝散率は小さな値を示し、材料のちがひによる差も小さくなる。本実験における角柱
 試体になされた程度の温度勾配に対しては、石灰石砂、川砂-①、川砂-②の熱伝散率にはほとんど
 差がないことになるのであろう。そのため、図示のように、この3者の試体温度は、どれも16
 時間を経過するころには、同じように直線分布となつたものと解することになる。軽石砂の場合
 24時間後の温度分布曲線は他の材料の8時間後の曲線と16時間後の曲線の中間の形状を呈し、
 この点から熱の移動は、他の材料に比し、はるかに緩慢であること、すなわち軽石砂の熱伝散率
 のいは熱伝率率は他の材料のものより小さいことがわかる(表1参照)。

つぎに24時間後の水分分布を見ると、水分勾配を生じているのは、石灰石砂と川砂-①とでは角
 柱の下部15cmと上部5cmの範囲であるのに対し、川砂-②では下部20cmと上部5cmの範囲とな
 つていて、軽石砂では底面から上面まで全範囲にあつてゐる。これより軽石砂より川砂-②の
 ほうが、川砂-②より川砂-①および石灰石砂のほうが保水性の高いこと、すなわちこの順に水分伝散
 率の値が小さくなるものと言えよう。

5. あとがき。 以上によって、 0°C 以上の温度のもとでは、砂の点の熱の移動に際しては、
 水分移動が同時におこり、お互いに助長し合つてゐること、砂の熱的性質が空隙率、含水率、温度勾
 配などの諸条件に強く依存することと示された。管路式超高压地中送電線のような地中に入らる
 る電熱体の温度上昇量を決定するには、まづおりの土砂について熱的性質の他の量への依存性があ
 るからにされねばならぬであらう。