

LNG地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第9報)

——凍結土の熱伝導率——

西林清茂 上野孝之
佐藤 哲

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas (Part 9)

——Thermal Conductivity of Frozen Soil——

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno
Tetsu Sato

Abstract

It is important to obtain the coefficient of thermal conductivity of soil for solving freezing and frost heaving problems such as excavation works in cold districts, the ground freezing method, and underground storage tanks for LNG. The authors measured the coefficient of thermal conductivity of soil between normal temperature and -80°C by the unsteady heat line method, described the influence of temperature, density, and degree of saturation, and then made comparisons with the theoretical equation. The following were disclosed as a result of the tests. (1) Coefficient of thermal conductivity increases with decline in temperature and the values of thermal conductivity are different from each other because of the nature of soil particles. (2) Coefficient of thermal conductivity of sand increases with increments of density, but that of clay is hardly influenced by density. (3) Coefficient of thermal conductivity increases with increment of degree of saturation and the ratio of increase becomes bigger with decline of temperature. (4) In the mechanism of heat transfer, it is necessary to consider heat transfer between pore water or nonfreezing water and soil particles.

概 要

土の熱伝導率を把握することは寒冷地における土木工事、地盤凍結工法、LNG地下タンクなどの凍結・凍上現象を解析する上で重要である。ここでは、非定常線熱源法を用いて土の熱伝導率を常温 $\sim-80^{\circ}\text{C}$ の範囲で測定し、温度、密度、飽和度の影響を調べ、さらに、理論式との比較検討を行なった。その結果以下のことが明らかになった。(1) 温度の低下に伴って、凍土の熱伝導率は大きくなるが、土の構成母岩の違いにより、値は異なる。(2) 砂の熱伝導率は、密度の増加に伴い、大きくなるが粘土の熱伝導率は密度の影響をほとんど受けない。(3) 飽和度の増加に伴い土の熱伝導率は増加するがその増加率は低温になるほど大きい。(4) 土の伝熱機構では土粒子と水あるいは不凍水の間の熱伝達率を考慮する必要がある。

1. まえがき

土が凍結すると土中水が氷に相変化する。氷は水の約4倍の熱伝導率を持っているため凍結土の熱伝導率は未凍土より大きくなる¹⁾。また氷の熱伝導率は温度の低下に伴って増加するので凍土の熱伝導率には温度依存性がある。このような凍結土の熱伝導率の温度依存性や、密

度、含水比の影響についての報告あるいは研究例は少なく十分に解明されていないのが現状である。

ここでは水分移動が生じるような材料に有効な手法である非定常線熱源法を用いて凍結土の熱伝導率を測定し、土質による相違、温度依存性、密度、含水比が熱伝導率に与える影響について調べた。また従来の理論式との比較を行ない、その結果について報告する。

2. 測定位置

2.1. 原理

この装置で採用している非定常線熱源法は試料の熱平衡を待たずに加熱線の温度上昇状態を捕えて熱伝導率を測定する方法である。無限大の物体中にある加熱線に電流を流すとジュールの法則に従い I^2R の熱を発生し、加熱線の温度は物体の熱伝導率に関係しながら上昇する。すなわち物体の熱伝導率が大きければ熱は急速に拡散するので加熱線の温度上昇は少なく、逆に物体の熱伝導率が小さい場合、熱が拡散し難いので加熱線の温度上昇は大きくなる。加熱線の温度と時間の関係は次式で表わせる。

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 t_0 : 補正項

θ_1 : 時間 t_1 における加熱線の温度

θ_2 : 時間 t_2 における加熱線の温度

q : 単位長さ当りの加熱線の発熱量

λ : 物体の熱伝導率

(1)式を変形し工学単位に換算すると、熱伝導率 λ は次式で表わせる。

$$\lambda = 0.1576R_0(1 + \alpha\theta) \frac{dE}{d\theta} \cdot I^2 \frac{d \log(t - t_0)}{dE} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 R_0 : 0°Cにおける加熱線の抵抗 (Ω/m)

α : 加熱線の抵抗の温度係数

θ : 加熱線の測定時平均温度 (°C)

$\frac{dE}{d\theta}$: 熱電対の熱電能 (mV/°C)

2.2. 測定装置

装置の全景を写真-1に示す。またシステム図を図-1に示す。装置は測定器本体と X-Y レコーダー、低温槽、温度コントローラー (PID 制御)、プログラムコントローラーより構成される。加熱線にはコンスタンタン線 ($\phi=0.3$ mm) を用いた。加熱線の温度を測定するために、加熱線にクロメルアルメル熱電対を溶接してある。熱電対の熱起電力は演算回路を通して熱伝導率としてデジタルで表示される。低温槽内の温度制御は常温から -120°C の範囲で液体窒素を噴霧させることにより行なう。測定はプログラムコントローラーにより測定器本体と低温槽を自動制御し、槽内温度と試料温度が一致し、さらに試料内の温度変化がない状態で測定を開始するシステムとした。

3. 試験方法

3.1. 試験条件

パラメーターは、温度、含水比、乾燥密度、飽和度、

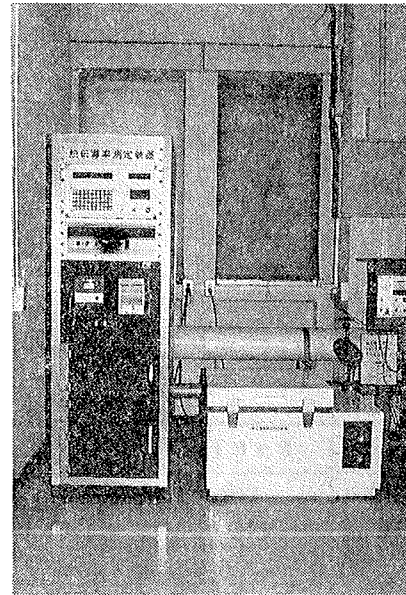


写真-1 熱伝導率測定装置

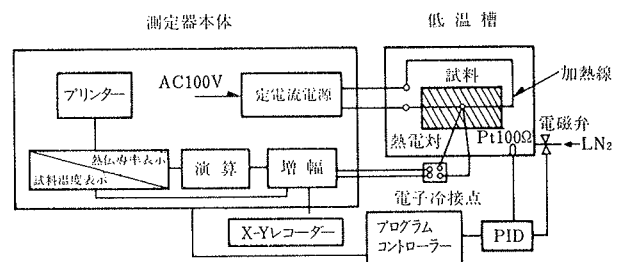


図-1 熱伝導率測定装置システム図

土質とした。測定は初めに室温で行ない、その後 -20°C で急速凍結し約 -80°C まで 10°C 間隔で行なった。各温度での測定は 6 回以上行ない、その平均値を測定値とした。氷が溶ける時の潜熱の影響がでないよう、また、対流が起きないように、加熱線の温度上昇が 2~3°C となるよう電流値を選定した。

3.2. 供試体作製方法

試料には豊浦標準砂と川砂(矢作産)、カオリン粘土を用いた。粒径加積曲線を図-2に示す。また作製した試料の物理特性を表-1に示す。

砂の供試体作製方法はつぎの方法で行なった。①脱気した蒸留水を 100×200×100 mm の加熱線をセットした試料箱に満たす (飽和度 0% のものを除く)。②所定の乾燥密度、 $\gamma_d=1.6, 1.5, 1.4$ g/cm³ となる重量の乾燥砂を重力落下と振動により、試料箱に充填する。

粘土の供試体作製方法は以下の方法で行なった。含水比 35% の試料は 1.5 kg/cm² の荷重で圧密し、成形したものを試料箱へ入れる。含水比 60, 118% の供試体は所定の含水比になるように蒸留水を加えソイルミキサーで練り混ぜ試料箱へ入れる。

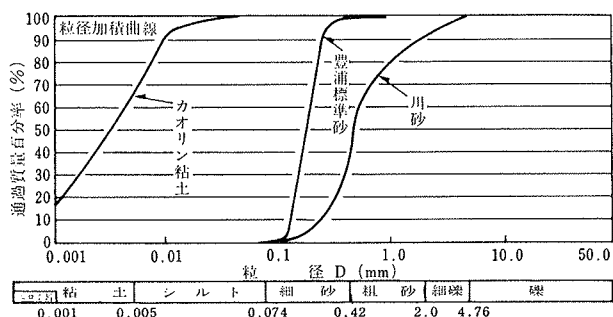


図-2 粒径加積曲線

	豊浦標準砂				川砂		カオリン粘土		
比重 G_s	2.642				2.703		2.696		
含水比 ω (%)	33.4	28.5	24.5	0.00	23.68	0.00	34.96	60.00	118.00
飽和度 S_r (%)	99.0	98.4	99.1	0.0	98.9	0.0	92.4	93.4	91.5
単位体積重量 ρ (g/cm ³)	1.87	1.93	1.99	1.50	1.96	1.50	1.80	1.58	1.31
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.40	1.50	1.60	1.50	1.50	1.50	1.33	0.98	0.60
体積含水率 ϕ_w	0.47	0.42	0.39	0.00	0.36	0.00	0.46	0.59	0.71
液性限界 W_L (%)	NP				NP		44.54		
塑性限界 W_i (%)	NP				NP		28.26		
塑性指数 I_p	-				-		16.28		

表-1 試料の物理特性

4. 試験結果と考察

4.1. 熱伝導率～温度

図-3 に土の熱伝導率と温度の関係を示す。絶乾状態の豊浦標準砂と川砂の熱伝導率は+20℃から-86℃の範囲でほとんど変化しない。これに対し飽和に近い砂と粘土の熱伝導率は未凍土から凍土に変わると大きくなり温度が低下するとさらに大きくなる。これは以下のように考えられる。空気の熱伝導率は 0.02 kcal/mh℃ と小さく、空気が絶乾状態の砂の間げきに存在する場合断熱材としての役割を果たし、熱伝導経路は土粒子→土粒子だけとなり熱伝導率は小さくなる。また土粒子の熱伝導率は温度依存性が小さいため試料全体としての熱伝導率も温度の影響を受けない。一方、水の熱伝導率は 0.5kcal/mh℃ であるが、それが 0℃ 以下になると氷への相変化に伴って、1.9 kcal/mh℃ となり、またこの値は温度の低下に伴い増加する。そのため飽和した試料の熱伝導経路は土粒子→土粒子、土粒子→水(氷)の2通りが存在し、絶乾状態の土の熱伝導率より大きくなり、低温領域では温度の低下とともに増加するのである。つぎに飽和に近い豊浦標準砂と川砂の熱伝導率を比較すると豊浦標準砂の方が未凍土から凍土のすべての領域で大きい。これは両者の構成母岩が異なり、豊浦標準砂は熱伝導率の大きい石英分 (7.57 kcal/mh℃) を多く含んでいるためと考

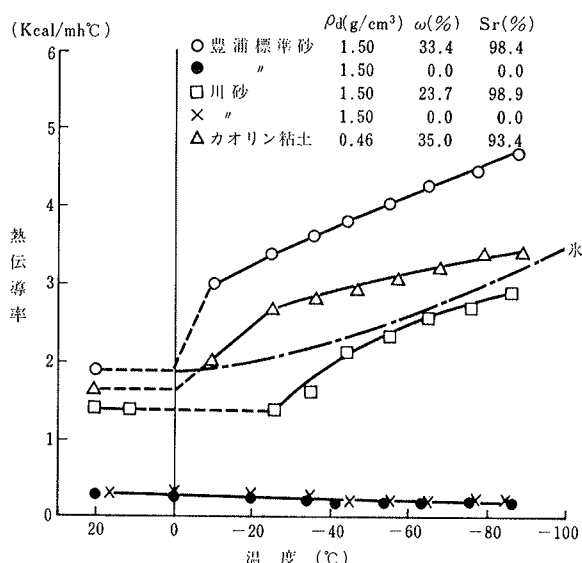


図-3 土の熱伝導率～温度

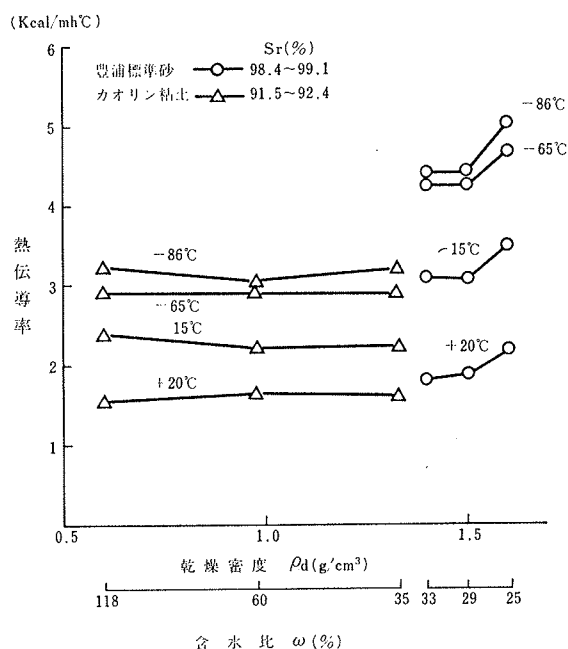


図-4 土の熱伝導率～乾燥密度・含水比

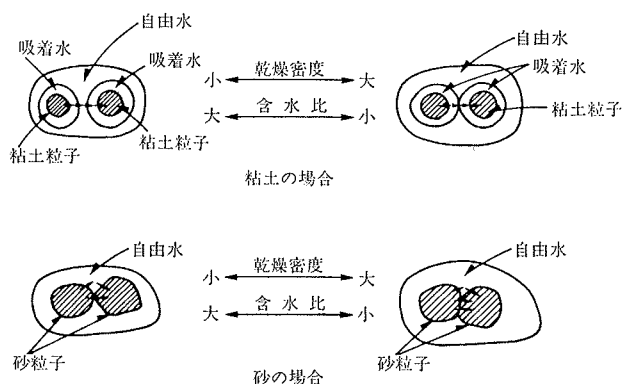


図-5

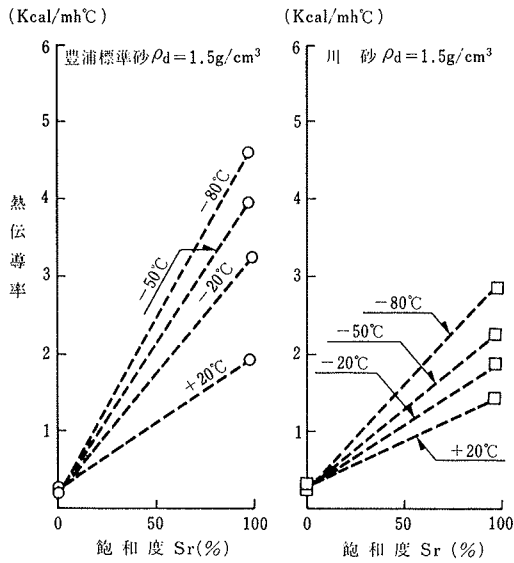


図-6 熱伝導率～飽和度 (砂)

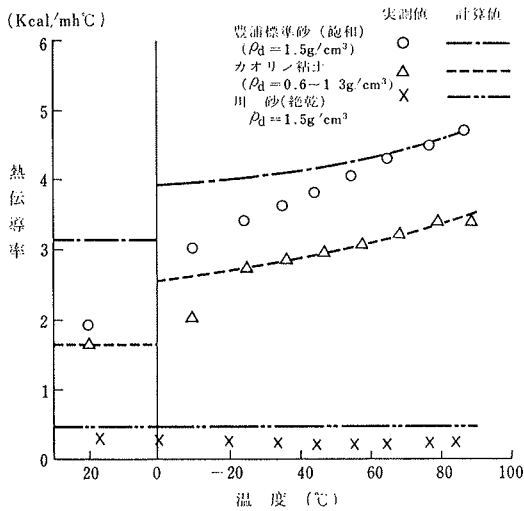


図-7 実測値と理論式の比較

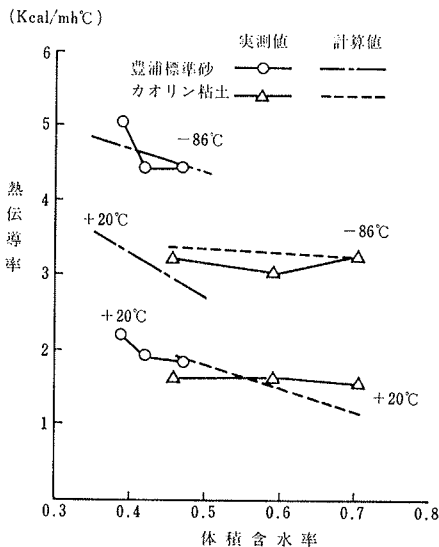


図-8 実測値と理論式の比較

えられる。

4.2. 熱伝導率～乾燥密度, 含水比

図-4 に土の熱伝導率と乾燥密度, 含水比の関係を示す。各温度で乾燥密度, 含水比が変化してもカオリン粘土の熱伝導率は変化しない。一方, 豊浦標準砂の熱伝導率は常温では乾燥密度の増加 (含水比の減少) に伴い増大する。また低温の領域になると熱伝導率は乾燥密度 1.5~1.6 g/cm³ の間で増加している。これらの結果は以下のように推察することができる (図-5)。すなわち粘土の場合, 乾燥密度が増加しても吸着水が存在するため熱伝導経路は土粒子→水 (氷) が主である。そのため粘土の熱伝導率は乾燥密度の影響を受けない。それに対して砂は粘土に比べ吸着水が極めて少なく, 熱伝導経路は土粒子→水 (氷) と土粒子→土粒子が残り, 乾燥密度が増加すると土粒子と土粒子の接触する面積が多くなり, 土粒子→土粒子の熱伝導経路が増え, 全体としての熱伝導率が増加する。

4.3. 熱伝導率～飽和度 (砂)

土の熱伝導率は常温では飽和度の増加に伴って増加するという報告²⁾がある。図-6 に, 豊浦標準砂と川砂の常温から-80°Cの範囲で各温度における熱伝導率と飽和度の関係を示す。実測値は飽和度0%と100%の2点しかないが, 飽和度の増加に伴う熱伝導率の増加割合は低温になるに従って大きくなるのがわかる。

4.4. 理論式との比較

熱伝導率の推定では熱流と電流の類似性を仮定し, 理論展開する場合が多く, 電気伝導率を推定する Maxwell の式³⁾が基礎となっている。ここでは理論式の中でも一般的な Eucken⁵⁾の式と実測値の比較を行なう。Eucken は熱伝導率の理論式を次式で与えている。

$$\lambda = \frac{1 - 2 \left[\frac{\lambda_s - \lambda_w}{\varphi_w 2\lambda_s + \lambda_w} + \frac{\lambda_s - \lambda_a}{\varphi_a 2\lambda_s + \lambda_a} \right]}{1 + \left[\frac{\lambda_s - \lambda_w}{\varphi_w 2\lambda_s + \lambda_w} + \frac{\lambda_s - \lambda_a}{\varphi_a 2\lambda_s + \lambda_a} \right]} \dots\dots\dots(3)$$

ここに, λ_s : 土粒子の熱伝導率

λ_w : 水の熱伝導率

$$0.477(1 + 0.003 t) \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

λ_a : 空気の熱伝導率

$$0.0207(1 + 0.003 t) \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

t: 温度

φ_w : 容積含水率 (0°C 以下では容積含水率)

φ_a : 空気含有率

図-7, 8 は(3)式と実測値の比較を示したものである。土粒子の熱伝導率として豊浦標準砂に 6.0 kcal/mh°C, カオリン粘土に 4.0 kcal/mh°C を, 川砂に 3.0 kcal/mh°C を用いた。カオリン粘土と絶乾状態の川砂の場合, 理論値と実測値がほぼ一致するのに対し, 飽和に近い豊浦

標準砂は -60°C 以上では温度が高くなるほど差が大きくなる。この原因は以下のように推論できる。理論式は土全体の熱伝導率を、土粒子、水（氷）、空気の3相の熱伝導率の算術平均で表わしているが、固相（土粒子）と液相（水）の間の熱伝達が考慮されていない。そのため固相と液相の間の熱の伝わりを過大に評価してしまう。このような理由により飽和に近い砂では不凍水の量が多くなるほど理論値と実測値の間に生じる差が大きくなる。粘土の実測値が理論値とほぼ一致するのは土粒子の比表面積が大きく、固相と液相の間の熱伝達の影響が見かけ上少なくなるためであろう。また絶乾状態の砂は土粒子→土粒子の熱伝導経路だけであるため理論値と一致する。

5. あとがき

凍結土の熱伝導率に対する温度、含水比、乾燥密度、飽和度の、また土質による違いを把握した。土の伝熱のメカニズムは、固相、液相、気相と三つの相が存在する

ために複雑である。それを理論式で表現するためには各相の熱伝導率の算術平均だけではなく熱伝達率を考慮することが必要であることがわかった。しかしながら熱伝達率は固相と液相の温度差、液相の速度、固相の表面の状態などに左右されるため、把握されていないのが現状である。採来、より正確な理論式を構成するためには土粒子と間げき水の中の熱伝達率の研究が必要であると思われる。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土の凍結—その制御と応用—，第2章，p. 47
- 2) 相馬尅之，前田隆：土の熱伝導率の水分，密度依存性，土の熱的性質に関するシンポジウム，(1986)
- 3) Eucken, A.: Die Wäremelcit fahigkeit keramisher feuerhester Stoffe, VID-Forschungsheft 353 Band 3, (1932)