

土の凍結・凍上および青森県における 路床構造の設計

諸 戸 靖 史*

Frost of soils and design of subgrade in Aomori Prefecture

Nobuchika MOROTO

Abstract

After reviewing Neuman's solution for determining the frost penetration depth in the soil ground, the author stated: (1) frost penetration depth and replacement ratio of subgrade, (2) design of frost blanket, (3) evaluation of softening during thawing period. Secondly, the author showed how to calculate the frost penetration depth from solutions of Berggren and Aldrich. Finally, the research performed in Aomori Prefecture was summarized.

1. はじめに

地盤を構成する土が冬期に凍結状態にあり、春になると融解するものを季節的凍上という。土が凍結すると下方からの水分の供給を供なって氷レンズを生成させ、土の体積を膨張させる。その結果、地盤の表面が持ち上げられたりする。季節的凍上では、春先には地表面からの融解と地下からの緩慢な融解により、凍結層の厚さが次第に減少していく。この時に、中間の凍結層が上部の融解水の下方への浸入を妨げ、多量の水分が貯留されることになる。そのうえ、土中に生成された氷レンズによって土の密度も小さくなっているので、せん断強さを低下させる。つまり、寒冷地において路床の設計や施工が十分でない、凍上そのものにより舗装面の不陸やクラックが生じ、融解時には路床支持力の低下に基づく被害が生じるものである。

2. 土の凍結と凍上

土の中の水（土中水）は、ある温度ですべて氷になるというのではなく、凍結しない部分が存在する。これを不凍結水とっている。この不凍結水と間隙水が同居するような凍結層を「凍結領域(Freezing fringe)」と呼んでいる。この凍結領域内の不凍水を通して、温度勾配の存在の下に、下部の非凍結層から水が吸収される。吸収された水が凍結して氷レンズが形成される。このような過程が繰り返されることによって凍上が進行していく。

凍結の様相は、寒さの程度、積雪の多少、凍結時の土の性質や植生など左右される。寒さの程度は、積算寒度または凍結指数 (Freezing index) と呼んでいる F の値で表現される。この F は、日平均気温 0°C 以下の積算値で、凍結期間とその期間中の平均気温との積 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$) で表される。 F が 150 以下になると凍結はほとんど認められないが、その以上になると凍結深さは放物線的に増大するといわれている。

積雪の熱伝導率は土の熱伝導率のほぼ $1/10$

平成 5 年 10 月 15 日受理

* 土木工学科教授
構造工学研究所 (併任)

といわれ、積雪と等価な土の凍結層の厚さは、積雪深の7~10倍と計算される。積雪深が15cm程度になると地盤の凍結進行はほとんど停止するとみなしてよいとされている。

凍上が生じるには、シルト以下の細粒土が必要である。古典的な知見として、Beskow(ベスコウ)が粒度と凍上量の関係を粒度調整した土を用いて調べた結果がある。それによると、氷レンズの分離は0.05~0.1mmの範囲の粒子を含む土になると起こり、0.05~0.02mmの粒子を含む土に最大凍上が生じることを、凍上の危険のない土は0.125mm以下、もしくは0.062mm以下の粒子が15%以下の場合としている。

3. 土の凍結深さを算定するためのノイマン解の説明

地中を上部から下部への凍結面が移動する過程は、氷の生成を伴う熱伝導問題として取り扱われている。通常、地盤凍結問題では、凍結面への水分移動はないものと仮定する。これを「単純凍結(In-situ freezing)」といている。実際の地盤凍結に近い微分方程式の解として、Neumann(ノイマンあるいはニューマン)のものがある。

半無限の広がりをもつ地盤の凍結を対象にして、一次元熱伝導方程式を立てる。初期条件として、地盤全層が $T_0 (>0^\circ\text{C})$ であったとする。地盤の表面温度を $T_s (<0^\circ\text{C})$ まで急激に低下させる。地盤の凍結は下方へ進行し、現在、深さ Z まで到達している。この条件で熱伝導の方程式を凍結、未凍結層について作る。

凍結層に対して

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \quad 0 < z < Z \quad (3-1)$$

未凍結層に対して

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \quad z > Z \quad (3-2)$$

ここで

α_1, α_2 : 凍結層, 未凍結層の温度拡散率
 Z : 凍結面までの深さ
 t : 経過時間
 T_1, T_2 : 凍結層, 未凍結層内温度

次に、凍結面での熱収支の条件は

$$T_1 = T_2 = 0 \quad (z = Z) \quad (3-3)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} - k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = L\rho \frac{\partial z}{\partial t} \quad (3-4)$$

k_1, k_2 : 凍結層, 未凍結層の熱伝導率
 L : 地盤の凍結に伴う潜熱
 ρ : 地盤の凍結後の密度
 $\partial z / \partial t$: 凍結面の進行速度

ここで、初期および境界条件は

- (1) $z > 0, \quad t = 0, \quad T_1 = T_0$
- (2) $z = 0, \quad t \geq 0, \quad T_1 = T_s$
 $z \rightarrow \infty, \quad t \geq 0, \quad T_2 \rightarrow T_0$
- (3) $z = Z, \quad t > 0, \quad T_1 = T_2 = 0$

微分方程式(3-1), (3-2)の解は、定数 $B_1, D_1,$

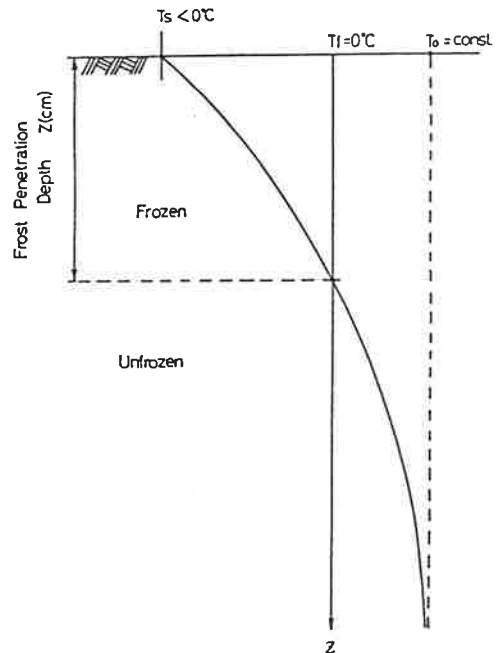


図3-1 地盤内の温度分布

B_2, D_2 を用い

$$T_1 = B_1 + D_1 \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2\sqrt{\chi_1 t}} \right) \quad (3-5)$$

$$T_2 = B_2 + D_2 \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2\sqrt{\chi_2 t}} \right) \quad (3-6)$$

ここで

$$\operatorname{erf}(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\beta e^{-x^2} dx \quad (3-7)$$

$$z=0 \text{ で } \operatorname{erf}(z)=0$$

$$z=\infty \text{ で } \operatorname{erf}(\infty)=1$$

であることから

$$B_1 = T_s \quad (3-8)$$

$$B_2 + D_2 = T_0 \quad (3-9)$$

$z=Z$ では

$$\begin{aligned} B_1 + D_1 \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2\sqrt{\chi_1 t}} \right) \\ = B_2 + D_2 \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2\sqrt{\chi_2 t}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3-10)$$

がすべての時間 t についてなりたつためには

$$Z = m\sqrt{t} \quad m: \text{定数} \quad (3-11)$$

でなければならない。式 (3-11) を (3-10) に入れると

$$B_1 + D_1 \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_1}} \right) = B_2 + D_2 \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_2}} \right) = 0$$

以上より各定数は次のように定まる:

$$B_1 = T_s \quad (3-12)$$

$$D_1 = -T_s / \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_1}} \right) \quad (3-13)$$

$$B_2 = T_0 \left\{ 1 - \frac{1}{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_2}} \right)} \right\} \quad (3-14)$$

$$D_2 = T_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_2}} \right) \right\} \quad (3-15)$$

したがって、凍結層・末凍結層の温度分布は

$$T_1 = T_s - T_s \frac{\operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\chi_1 t}} \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_1}} \right)} \quad (3-16)$$

$$T_2 = T_0 - T_0 \frac{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\chi_2 t}} \right)}{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_2}} \right)} \quad (3-17)$$

また,

$$\left(\frac{\partial T_1}{\partial z} \right)_{z=Z} = \frac{D_1}{\sqrt{\chi_1 \pi t}} \cdot e^{-\frac{m^2}{4\chi_1}}$$

$$\left(\frac{\partial T_2}{\partial z} \right)_{z=Z} = \frac{D_2}{\sqrt{\chi_2 \pi t}} \cdot e^{-\frac{m^2}{4\chi_2}}$$

を式 (3-4) に入れると

$$\begin{aligned} \frac{mL\rho\sqrt{\pi}}{2T_s} = & -\frac{k_1}{\sqrt{\chi_1}} \frac{e^{-\frac{m^2}{4\chi_1}}}{\operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_1}} \right)} \\ & - \frac{k_2}{\sqrt{\chi_2}} \left(\frac{T_0}{T_s} \right) \frac{e^{-\frac{m^2}{4\chi_2}}}{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{m}{2\sqrt{\chi_2}} \right)} \end{aligned} \quad (3-18)$$

を得る。この式は式 (3-11) の定数 m は多くの量に関係していることを示している。

$$m = f(k_1, k_2, \chi_1, \chi_2, T_0, T_s, L, \rho) \quad (3-19)$$

さらに,

$$\gamma = m / 2\sqrt{\chi_1} \quad (3-20)$$

とおき,

$$k_1 = C_1 \rho \cdot \chi_1 \quad (C_1: \text{凍結層の比熱})$$

を使うと、式 (3-18) は次のようになる:

$$\begin{aligned} \frac{L\sqrt{\pi}\gamma}{T_s C_f} = & \frac{e^{-\gamma^2}}{G(\gamma)} - p \left(\frac{T_0}{T_s} \right) \frac{e^{-(b\gamma)^2}}{1 - G(b\gamma)} \\ p = & \frac{k_2}{k_1} \sqrt{\frac{\chi_1}{\chi_2}} \end{aligned} \quad (3-21)$$

$$b = \sqrt{\frac{\chi_1}{\chi_2}}$$

$$G(\gamma) = \operatorname{erf}(\gamma)$$

ここで,

$$\mu = \frac{C_f |T_s|}{L} \quad (C_f: \text{容積比熱}) \quad (3-22)$$

$$\tau = \frac{T_0}{|T_s|} \quad (3-23)$$

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{2|T_s|k_1 t}{L}} \quad (3-24)$$

とおくと、

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\mu}} \quad (3-25)$$

$$\frac{\sqrt{\pi} \cdot \gamma}{\mu} = \frac{e^{-\gamma^2}}{G(\gamma)} - b\tau \frac{e^{-(b\tau)^2}}{1 - G(b\tau)} \quad (3-26)$$

最後の方程式を γ について trial and error 法で解き、 b と p を与えると τ をパラメーターにした λ と μ の関係が得られる。現行の設計法は、このようなことを行っている。

4. 寒冷地における路床の凍結深さと置換率

寒冷地において、路床部が凍結深さ内に入る場合には、凍上・凍結融解を考慮した路床設計を行う。対策としては、通常、凍上および凍結融解による支持力低下を起こしにくい材料で置換することが行われる。凍上を起こしにくい材料としては、一般に砂・切込み砂利・切込み碎石などの粒状材料が用いられる。凍上の影響を全く無くするためには、凍結のおよぶ範囲までの土をすべてこれはの材料で置換えればよいことになる。しかし、凍結指数が $500^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ を超えるような寒さの厳しい地域では、凍結深さが大きくなり、最大凍結深さまで置換することは不経済となる。寒さの厳しい地方では、最大凍結深さの約 70% を置換すればよいとされている。

これは次のように理解される。北海道において 30~50 cm の凍結した砂利道を切開してみると、霜柱の多くは砂利道直下に発達し、凍上量の大部分はこの路床の上層部で占められており、下層に回って急激に減少している事実を伊福部が示した。つまり、在来砂利道の凍結深さの 80% を凍上を起こしにくい材料で置換えれ

ば、統計的にはその凍上量は置換えを行わないときの約 1% にすぎない。したがって、このときの置換深さを D_r 路床部分の凍結深さを D_s とすると

$$D_s/D_r = 20/80$$

この場合、最大凍結深さ D_{\max} を次の概略値で与えると

$$D_{\max} = D_r + 1.8 \times D_s$$

上の 2 式から

$$D_r \doteq 0.7 D_{\max}$$

をえる。つまり、置換深さは最大凍結深さの 70% をとればよいことになる。

最大凍結深さを設計に用いる場合の基準となる凍結深さとして、最近では理論最大深さ Z_{\max} が久保¹⁾らにより導入されている。これは、凍上対策工法を検討する場合を凍結深さを言い、凍上を起こしにくい均一な粗粒材料からなる地盤の、最近 10 年間のうち最も寒さの厳しい年の最大凍結深さをとるのである。ただし河野²⁾は凍結指数は年ごとに変動するので、設計にあたっては 10~30 年くらいの統計から決めなければならないと述べている。

現在の実務上の取扱において、寒さの厳しいところ（凍結数 $F > 500^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ ）理論最大凍結深さの約 70% まで低減し置換を行えばよいと指針³⁾に書かれてある。また $F < 500^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ の地方では理論最大深さの 100%~70% となっている⁴⁾。この場合、通常はその地方の実績や経験から低減率を決定している。

5. 凍上抑制層の設計

舗装厚の設計では、置換え深さと計画舗装断面の合計の厚さと比較し、もし置換え深さが大きい場合には、路盤の下にその厚さの差だけ凍上の生じにくい材料の層を設ける。この部分を凍上抑制層（frost blanket）と呼び路床の一部と考える。もしもその下の路床が軟弱な場合に

は、20 cm 程度の遮断層 (filter layer) を凍上抑制層の下にさらに加えることもある。また、凍上抑制層と遮断層の働きを兼ねさせることができる。

では、実際に問題になるのは

- 1) 置換え深さの算定の基準となる設計凍結深さをどう決定するのか、
- 2) 置換え材料をどう選定するのか、
- 3) 凍結・融解時の支持力低下について安定かどうかをどう判断するのか、

である。通常、寒冷地路床の手順として図 5-1 のようなフローが考えられる。

5-1 凍上そのものに対する検討

置換え深さは、必要な深さが経験的に分かっている場合は、その値をそのまま採用する。不明の場合は、実測するか気象データを用いて設計凍結深さを計算し、その地方による低減率を乗じて置換え深さを算定する。

実測による調査法としては

- 1) メチレンブルー凍結深度計による方法
- 2) 調査孔による方法

がある。いま実測された年の最大凍結深さ D_e が判明したとする。この D_e から理論最大凍結深さ D_{max} は

$$D_{max} = D_e \sqrt{F_{max}/F_e}$$

F_{max} : 現地の最近 10 ケ年間の最大凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)

F_e : 現地で調査した年の凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)

D_e : 換算凍結深さ (cm)

D_{max} : 理論最大凍結深さ (cm)

ここに

$$D_e = D_c + 1.8D_f$$

として求めることが出来るとされている。

D_c : 実測した凍結深さの内の凍上を起こしにくい粗粒材料からなる層の厚さ (cm)

D_f : 実測した凍結深さ内の凍上を起こし

やすい細粒材料からなる層の厚さ (cm)

次に計算により D_{max} を推定する場合に付いて述べよう。

$$D_{max} = C\sqrt{F_{max}} \quad (5-2)$$

ここで、定数 C の値として F_{max} により表 5-1⁴⁾ のような表が意されている。

表 5-1 凍結指数と定数 C

F ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)	C 値
100	3.7
200	4.1
300	4.4
400	4.6
500	4.7
600	4.8
700	4.9
800	5.0
900	5.0
1000	5.1
1100	5.2

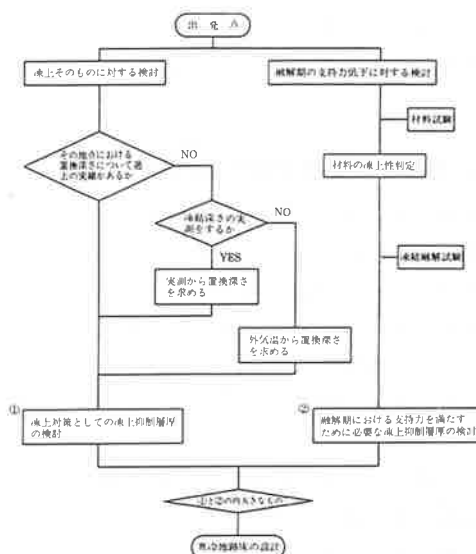


図 5-1 寒冷地路床の設計手順

5-2 凍上を起こしにくい材料の選定

粒度に基づく凍上抑制層の材料品質として次のようなものがある。

土粒子の最大寸法は 100 mm であり、

- 1) 砂：0.074 mm ふるい通過量が全試料の 6% 以下
- 2) 切込み砂利 (pit-run gravel)：0.074 mm ふるい通過量が 4.76 mm 通過量の 9% 以下
- 3) 切込み碎石 (crusher run)：0.074 mm ふるい通過量が 4.76 mm 通過量が 15% 以下
- 4) 火山灰質砂質土・火山礫：0.074 mm ふるい通過量が全試料の 20% 以下で強熱減量が 4% 以下であり、かつ風化の徴候がなく、排水性の良好なもの、また、力学的品質として、凍結・融解後の CBR が 10 以上。

これらが、日本道路公団の規定⁵⁾である。ここには、上に述べた品質を満たさなくても凍上を起こしにくい材料が多いものと考えられ、凍上試験等により適否を判定するものとする、という但し書が付いている。また、施工時に車両のタイヤから細粒分が混入したり、他の層から浸入するであろうことも考えて置かなければならない。

5-3 融解時の支持力低下の検討

最大凍結深さまで置換え工法を取れば、春の融解期の路床支持力低下が防止できる。しかし、その地方で過去の経験に基づいて決められている低減率を最大凍結深さに乗じて置換え深さを算定すると、路床内に凍結深さが浸入する。このところで春の融解期の支持力低下の問題が生じてくる。

日本道路公団⁵⁾は、融解期のたわみ規定から必要な路床厚の設計を行っている。つまり、理論最大凍結深さが路床内に及ぶ場合には、凍結融解時において上部路床面上(凍上抑制層)で、

次のようなたわみ規定を行う複輪 5 tf、タイヤ空気圧 7 kgf/cm² でたわみ量 5 mm 以下を満たすような設計を要求する。この場合路床の剛性は凍結・融解後の CBR を用いて算定する。また、路床上の変形係数 E (kgf/cm²) は CBR を用いて

$$E = 40 \times \text{設計 CBR} \quad (5-3)$$

として計算する。

ここで例題演習を行ってみる。

〈例題〉

最大凍結指数 $F_{\max} = 550^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$

舗装厚 48 cm

路床部に使用する材料の強度(凍結・融解後の CBR)

上部路床土(凍上抑制層材)：CBR = 30

下部路床土 : CBR = 2

として、凍上抑制層の厚さを求めよ。

イ) 凍上対策のために必要な凍上抑制層の厚さの計算

$$\text{理論最大結深さ } D_{\max} = 4.8 \times \sqrt{550} = 113$$

cm

$$\text{置換深さ} = 113 \times 0.7 = 79 \text{ cm}$$

$$\text{凍上抑制層の厚さ} = 79 - 48 = 31 \text{ cm}$$

ロ) 融解期のたわみ規定から必要な路床厚の計算

凍結深さが下部路床まで達する。

ここで、式(5-3)を用いると、

$$\begin{aligned} \text{上部路床の変形係数 } E_1 &= 40 \times 30 \\ &= 1200 \text{ kfg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{下部路床の変形係数 } E_2 &= 40 \times 2 \\ &= 80 \text{ kfg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{図 5-2 より、上部路床の厚さ } h_1 &\text{ は } h_1 \\ &= 30 \text{ cm} \end{aligned}$$

この場合下部路床厚 h_2 は理論最大凍結深さ D_{\max} まであればよく

$$h_2 = 113 - (48 + 30) = 35 \text{ cm}$$

となる。

ハ) 上記のうち大きい方の凍上抑制層の厚

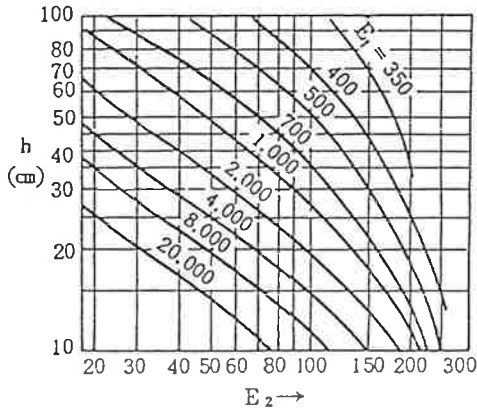


図 5-2 2層構造の路床厚

さは $h_1=31$ cm となり、この場合、下部距路床厚さ h_3 は理論最大凍結深さまでの $h_3=113-(48+31)=34$ cm となる。

6. ベルグレンとアルドリッヒによる解を用いた凍結深さの工学計算

6-1 一様地盤の場合

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{172800KF}{L}} \quad (6-1)$$

Z : 凍結深さ (cm)
 F : 凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)
 K : 凍結時と未凍結時の平均熱伝導率
 (cal/cm \cdot sec \cdot $^{\circ}\text{C}$)

L : 融熱 ($\doteq 0.80 w \cdot \rho_d$) (cal/cm 3)

ω : 含水比 (%)

ρ_d : 乾燥密度 (g/cm 3)

$\lambda = f(\mu, \tau)$: 補正係数

$\mu = |C_1| \cdot C \cdot \rho_d / L$: 融解パラメーター
 (fusion parameter)

$C_1 = F/t$: 凍結期間中の平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)

t : 凍結期間 (days)

$C = (0.17 + 0.0075 \omega)$: 比熱 (cal/g \cdot $^{\circ}\text{C}$)

$Q = (C \cdot \rho_d$: 熱容量 (cal/cm $^3 \cdot$ $^{\circ}\text{C}$)

$\tau = C_2 / C_1 = C_2 \cdot t / F$: 熱比 (thermal ratio)

上の式 (6-1) は修正 Berggren (ベルグレン) 式と呼ばれるもので、式 (3-24)

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{2|Ts|k_1 t}{L}} \quad (6-2)$$

を $|Ts| = |C_1|$, $k_1 = K$

に置換え、凍結指数を CGS 単位に書き換えると得られる。

道路土工排水工指針はこの式を用い、

$$Z = C\sqrt{F} \quad (6-3)$$

と書いている。ここに、

Z : 凍結深さ (cm)

F : 凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)

C : 定数

同指針では地盤の含水比 $w=15\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.8$ g/cm 3 と仮定し表 5-1 の値を砂や砂利などの凍上を起こしにくい材料に対して求めたと書いてあるが、計算に必要な他の熱的諸量に付いての記述はない。伊福部は式 (6-1) が砂利道の凍結深さに適用して実測と一致することを示しているようであるが、最近福田⁶⁾によって 1974~1975 にかけて北海道・帯広の事例が報告されている。地盤は火山灰土で実測値から、

$L=46$ cal/cm 3 , C_f (比熱) $=0.6$ cal/cm $^3 \cdot$ $^{\circ}\text{C}$

$k_1=3.68 \times 10$ cal/cm \cdot sec \cdot $^{\circ}\text{C}$

をえた。また気象データから

$C_2=6.1$, $|Ts| = |C_1| = 6.1$, $F=840^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$

ここで、

$$\mu = \frac{C_f}{L} C_1 = 0.6 \times 6.1 / 46 = 0.08$$

$$\tau = C_2 / |C_1| = 6.1 / 6.1 = 1.0$$

となる。

式 (6-2) に上の諸量に入れ $\lambda = f(\mu, \tau)$ の関係として図 6-1 を用いると

$$\lambda = 0.82$$

がえられる。ただし、体積含水率を 40% とした。

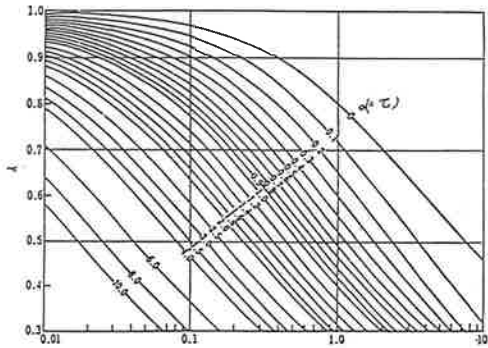


図 6-1 $\lambda = f(\mu, \tau)$ の関係 (福田による)

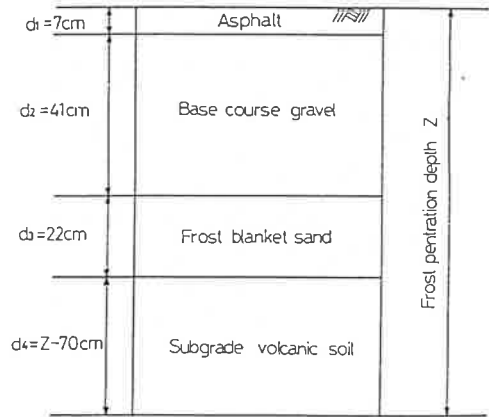


図 6-2 道路構造

以上の諸量を式(6-2)に入れ、 F の単位をCGSにして計算すると、

$$Z = 0.82 \sqrt{\frac{172800 \times 820 \times 0.00368}{46}} = 88 \text{ cm}$$

同時期における帯広畜産大学構内における最大凍結深さは86 cmであり、上の推定値に極めて近いということである。

6-2 多層地盤の場合

Aldrich(アルドリッヒ)の修正 Berggen の式を多層地盤について次の様に示した⁷⁾：

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{172800 F}{(L/K)_{\text{eff}}}} \quad (6-4)$$

ここに

$$(L/K)_{\text{eff}} = \frac{2}{Z^2} \left\{ L_1 d_1 \left(\frac{d_1}{2K_1} \right) + L_2 d_2 \left(\frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{2K_2} \right) + L_3 d_3 \left(\frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{K_2} + \frac{d_3}{2K_3} \right) + \dots + L_n d_n \left(\frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{K_2} + \dots + \frac{d_n}{2K_n} \right) \right\}$$

$Z = d_1 + d_2 + \dots + d_n$ ：予想凍結深さ (cm)

d_n ：予想凍結深さ内の各層の厚さ、 d_1 は最上層の厚さ (cm)

K_n ：各層の熱伝導率 (cal/cm・sec・°C)

L_n ：各層の潜熱 (cal/cm³・°C)

$\lambda = f(\mu, \tau)$ ：補正係数

$\mu = Q_{wt} \cdot F / (L_{wt} \cdot t)$

$Q_{wt} = (Q_1 d_1 + Q_2 d_2 + \dots + Q_n d_n) / Z$ ：
加重平均による熱容量で、 Q_1 は最上層のもの (cal/cm³・°C)

$L_{wt} = (L_1 d_1 + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n) / Z$ ：

加重平均による潜熱で、 L_1 は最上部層のもの (cal/cm³)

<例題>

図 6-2 で示されるような道路構造がある。

青森酸ヶ湯の1988～1989年にかけての凍結指数 F は 550°C・days で、凍結日数は 141 days であった。

この場合の凍結深さを求めよ。

予想凍結深さを 100 cm とする。

舗装各層の熱容量 Q ・熱伝導率 K ・潜熱 L は表 6-1 などから次のように仮定する。

$$Q_1 = 0.448 \quad Q_2 = 0.445 \quad Q_3 = 0.466$$

$$Q_4 = 0.627 \text{ (cal/cm}^3 \cdot \text{°C)}$$

$$K_1 = 0.00346 \quad K_2 = 0.0060 \quad K_3 = 0.0047$$

$$K_4 = 0.00343 \text{ (cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{°C)}$$

$$L_1 = 0 \quad L_2 = 11.2 \quad L_3 = 19.8$$

$$L_4 = 46.0 \text{ (cal/cm}^3 \text{)}$$

また厚さは、

表 6-1 備装構成材料の熱的定数

材 料 名		熱伝導率 (K) (cal/cm ³ ・°C)	熱容量 (Q) (cal/cm ³ ・°C)	融解潜熱 (L) (cal/cm ³)
アスファルトコンクリート		0.00346	0.448	0
セメントコンクリート		0.00224	0.480	0
切込砕石	$\rho_a=2.0$ g/cm ³ $\omega=5$ %	0.00509	0.415	8.0
切込砂利	$\rho_a=2.0$ g/cm ³ $\omega=7$ %	0.00600	0.445	11.2
砂	$\rho_a=1.65$ g/cm ³ $\omega=15$ %	0.00470	0.466	19.8
火山灰	$\rho_a=0.95$ g/cm ³ $\omega=50$ %	0.00275	0.518	38.0
土	$\rho_a=1.15$ g/cm ³ $\omega=50$ %	0.00343	0.627	46.0

$$d_1=7 \quad d_2=41 \quad d_3=22 \quad d_4=30(\text{cm})$$

$$(L/K)_{\text{eff}} = \frac{2}{100^2} \left\{ \frac{7}{0.00346} \left(\frac{0 \times 7}{2} + 11.2 \times 41 + 19.8 \times 22 + 38 \times 30 \right) + \frac{41}{0.0060} \left(\frac{11.2 \times 41}{2} + 19.8 \times 22 + 38 \times 30 \right) + \frac{22}{0.0047} \left(\frac{19.8 \times 22}{2} + 38 \times 30 \right) + \frac{30}{0.00275} \left(\frac{38 \times 30}{2} \right) \right\}$$

$$= 5.805 \times 10^3$$

$$Q_{wt} = \frac{0.448 \times 7 + 0.445 \times 41 + 0.466 \times 22 + 0.518 \times 30}{100}$$

$$= 0.472$$

$$I_{wt} = \frac{0 \times 7 + 11.2 \times 41 + 19.8 \times 22 + 38 \times 30}{100}$$

$$= 20.35$$

$$\mu = \frac{Q_{wt} \cdot F}{L_{wt} \cdot t} = \frac{0.472 \times 550}{20.35 \times 141} = 0.090$$

$F=550$ (°Cdays) で図 6-3 から $\tau=1.4$, 図 6-4 から $\mu=0.090$, $\tau=1.4$ で $\lambda=0.82$ となるので,

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{172800 F}{(L/K)_{\text{eff}}}} = 0.82 \sqrt{\frac{172800 \times 550}{5.805 \times 10^3}} = 104.9 \text{ cm}$$

次に凍結深さを $Z=(100+105)/2=102.5$ cm として再計算する。

$$(L/K)_{\text{eff}} = 5.976 \times 10^3$$

$$Q_{wt} = 0.473,$$

$$L_{wt} = 20.78, \mu = 0.089,$$

$$\tau = 1.4, \lambda = 0.82$$

$$Z = 0.82 \sqrt{\frac{172800 \times 550}{5.976 \times 10^3}} = 103.4 = 103 \text{ cm}$$

したがって、求める凍結深さは 103 cm である。

7. 青森県における調査・研究の試み

青森県における凍結深さの調査は、昭和 29 年から 2 年経続されて始まった。昭和 35 年には、実測値と Stefan の式を援用した式との比較が行われたようである。実測による氷レンズを認める最低線は、地温測定にある 0°C せんより 4 cm 程度上方に観測されている。

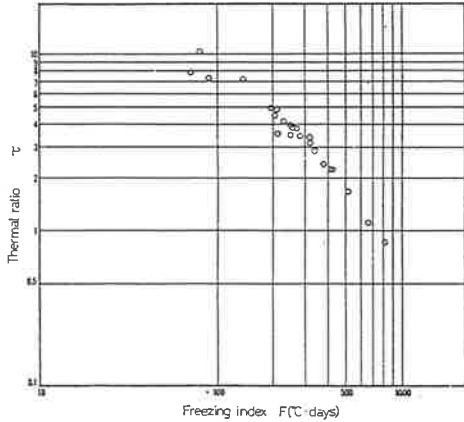


図 6-3 青森県における熱比と凍結指数

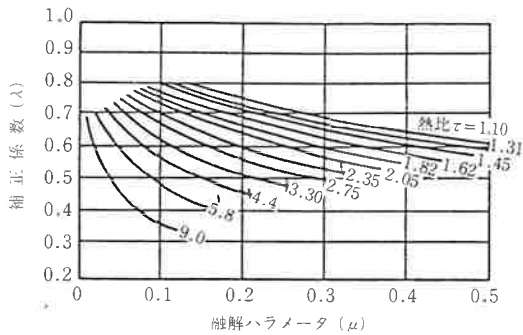


図 6-4 $\lambda = f(\mu, \tau)$ (Aldrich による)

昭和 60 年次までは図 7-1 に示されているように、置換深さとして各地域ごとに 45~60 cm が採用されていた。

昭和 51 年から青森県では東北大学等の協力をえて、県内 17 路線の 23 地点における現道および粗粒材置換えの舗装道路について調査解析を実施した。

その主な結果は次のようであった⁸⁾。

- 1) 凍上量は概ね 3~5 cm で、舗装面にクラックは 1 ケ所を除いて発生していない。
- 2) 凍結深さ Z と凍上量 S の経時変化は比較的よく対応し、最大凍結深さ Z_{max} の発生時期にほぼ最大凍上量が観測された。この Z_{max} と S_{max} の発生はほとんど

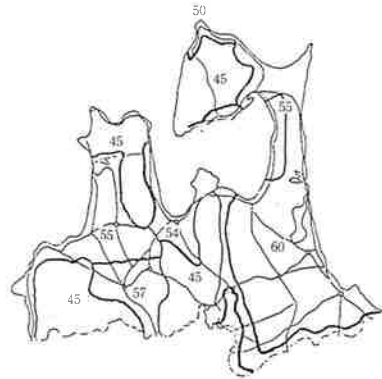


図 7-1 昭和 60 年までの青森県における置換深さ

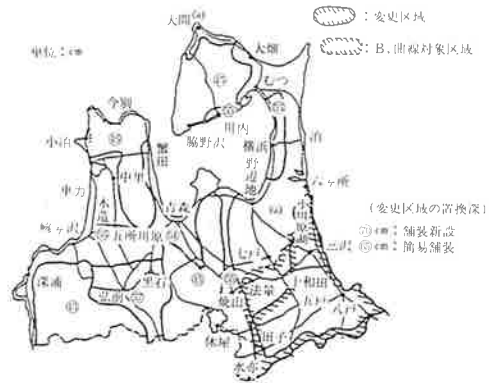


図 7-2 昭和 61 年以降の青森県における置換深さ

2 月中旬から下旬にかけてである。

- 3) 凍結深さ Z を地域的にみただけの場合、十和田及び八戸では 90 cm 以上 (77~98 cm) と全般的に大きかった。
- 4) 式(6-3)の定数 C を観測地から逆算してみると、凍結指数 F をおおきくなる程やや小さくなる傾向があった。全体的に見れば 3~5 の間に入るものが多い。
- 5) 理論最大凍結深さ D_{max} を求めるにあたり、少雪地域多雪地域を区別して考える方が妥当である。
 - イ) 少雪地域では実測最大凍深さ Z_{max} を重視し、この Z_{max} と融解期の平均気温を用いた Aldrich 式の計算値と

比較し、大きい方を D_{\max} とする。

- ロ) 多雪地域では、実測凍結深さが積雪の影響で小さめに観測がちであることから、外気温により算出される凍結指数 F_{\max} を用いアスファルト舗装要綱による。
- 6) その結果、図 7-2 に示すような道路の置換深さを用いて、青森県庁は道路を建設することになった。

その後本県では、ロームが路床土の対象となる場合が多いことから、ロームの特性およびその安定処理したロームの力学的特性、また安定処理をしたロームの凍結時の性状などを、昭和 61 年度から八戸工業大学で継続的に調査・研究をしている。その結果の一部は、諸戸・桜田によってフィンランドの国際学会で報告されている⁹⁾。

生石灰安定処理はトラフィカビリティーばかりではなく、凍結時にもロームの凍結性状を改善することが確認されている。

引用文献

- 1) 久保 宏：積雪寒冷地舗装の凍上対策，土木学会誌，1979年2月号，pp.10-16
- 2) 河野文弘：地盤の凍結と凍上，土と基礎。25-7 (233)，pp.11-15 (1977)
- 3) 「アスファルト舗装要綱」，日本道路協会。昭和63年版
- 4) 「道路土工排水工指針」，日本道路協会，昭和62年6月
- 5) 「土工設計要領」，日本道路公団
- 6) 福田正巳：地盤の凍結と凍上メカニズム，土と基礎。38-4 (387)，pp.10-16 (1990)
- 7) 土質工学会：「土の凍結—その制御と応用—」昭和57年
- 8) 青森県道路建設課：青森県の道路における凍上置換深さと今後の運用方向，青建"56" 1986.3. pp.15-23
- 9) Moroto, N. and Sakurada, T.: Frost susceptibility of soils in Aomori Province, Japan, Proc. of VTT Symposium 95-Frost in geotechnical engineering, pp. 547-556 (1989)