

非線形熱伝導モデルによる凍結深さと凍上量の予測

東北大学 学生員 ○高橋誠一
 正会員 柳沢栄司
 学生員 小橋秀俊

(1) はじめに 東北地方の寒冷においては道路の凍上対策のために地盤の凍結深さ・凍上量を適確に予想する必要がある。この地盤の凍結現象を解析的に解いた例としてはNeumann解が知られている。しかし、この解はかなり理想化された境界条件で解かれたものであり、実際の条件をこの解にあてはめて解くことは無理な場合がある。一方実用的な式であるAlderichの式は、北海道などの事例によくあてはまるが、ここで解析を行なった青森県などのような場合にはあまりよくあてはまらないと言われている。そこで、熱伝導と水移動を考慮したより現実的な数値解法により、多層地盤の凍結深さと凍上量を予測することを試みたのでここに報告する。

(2) 解析方法 凍土内においては、水分移動と熱伝導は互いに影響を受けあっているのでこれらの2つの式を別々に解かず、これらの2つの式をカップリングさせた次式を用いて解析を行なう。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\rho_i}{\rho_w} L \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 C : 土の容積比熱 ($\text{cal/cm}^3\text{C}$)、 x : 位置 (cm)、 t : 時間 (sec)
 λ : 土の熱伝導率 ($\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot\text{C}$)、 L : 水の凍結潜熱、 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 ϕ_i : 体積含水率 (cm^3/cm^3)、 ρ_i : 氷の密度 (g/cm^3)、 ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)
 である。

数値解析にあたっては、熱伝導率、比熱・密度などの諸定数および、温度と不凍水分量(凍土内の未凍結状態の水)との関係を正しく与える必要がある。ここでは、初期値として既知のものを実測値を、それ以外は代表的な値を与えた。そのうち、Euckenの式などの経験式を用いて時間と共に変化する諸定数を定めた。なお、(1)の式を作る際に次のような仮定をたてた。

- i) 対象土は均質で、完全飽和しており、土粒子および水は非圧縮性である。
- ii) 未凍結土内の間隙水圧分布はTerzaghiの圧密方程式に従う。
- iii) 未凍土内の水分移動はDarcyの法則に従う。
- iv) 凍土内の間隙水圧は凍結面の間隙水圧より凍結した水分量だけ低下する。

なお、解析は、図-1のフローチャートに従うものとする。

3. 計算結果及び考察 今回は、図2に示されるような気温分布を持つ青森県油川での気象データをもとに解析をこころ見た。この地点は、図-3を見ればわかるように、凍結期間107日、凍結指数 $303.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ と東北地方北部では平均的な場所といえる。初めにAlderichの式を用いて凍結深さを求めてみた。Alderichは熱伝導論に基づく静水の水層生成に関するNeumannの解を多層地盤にも適用できるように修正した実用的な式である。Alderichの式によればこの地点の凍結深さは、 78.3cm と、かなり大きな値が得られた。

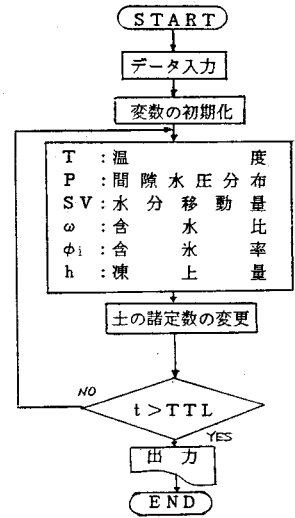


図-1 フローチャート

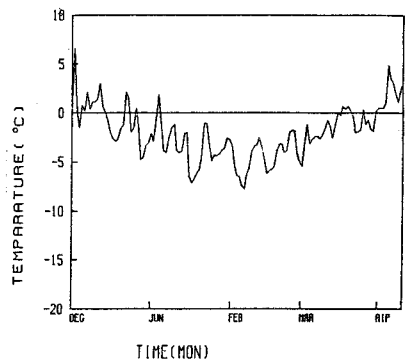


図-2 時間と温度

次に、本研究の主題である数値解法を用いて、凍結深さと凍上量の予測を行った結果を図-4に示す。この図中で実線が数値解析により求めた結果であり、破線が実測による凍結深さである。なお、黒く塗りつぶした箇所は、地中が凍結しているのに、地表面が解け始めていることを表している。実測による最大凍結深さは、2月20日の時点で57.2cm。数値解法による最大凍結深さは、2月20日で65.2cmであった。実測に較べ計算により求めた凍結深さは数値解法においてもAlderichの式を用いて得た結果いずれも大きかった。Alderichの式を含めたNeumann解の修正解は基本的には、凍結深さが凍結指数の平方根 \sqrt{F} に比例すると考えている。しかし、図-3と図-4の実測による凍結深さを比較してもなにか相関関係は見られない。図-3を見れば凍結指数は、3月の末まで増加しつづけるにもかかわらず、凍結深さは、2月20日をピークに減少し始めている。図-5にFと凍結深さとの関係を示したが、初期においては関連性があるが途中からはほとんど関連を示さなくなり、 \sqrt{F} で凍結深さを推定するのは当てはまらない。一方、数値解法による結果を見ると、実測値に較べ初期の凍結速度は大きい、それ以後の挙動はほぼ実測値と一致する。計算したデータが少ないので一概には言えないものの、各層の熱的性質を変えたことにより実測値に近い値が得られると考えられる。

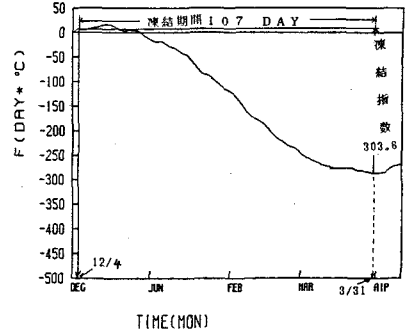


図-3 時間と凍結指数

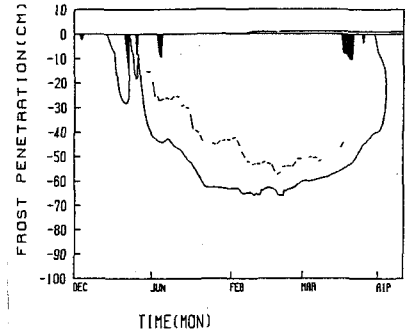


図-4 時間と凍結深さ

次に、図-2と図-4とを比較した場合、最低気温のあった時がある時間差をへて凍結深さが最大となることが見てとれる。熱伝導だけ考えた場合でも、地表面の温度が地中に伝達するには時間がかかっているので、地表面温度が凍結面に影響をおよぼすまでには時間差が生ずる。また、路床土側では、吸水による含水比の増加があったが、未凍土領域からの熱流は凍土の融解時に、凍結潜熱を発生することにより、温度低下がせまげられるなどの現象が認められる。すなわち、青森県などのように北海道に較べ凍結期間が短い地域では、凍結指数よりも気温の変化が直接凍結深さに影響することがこれで理解される。

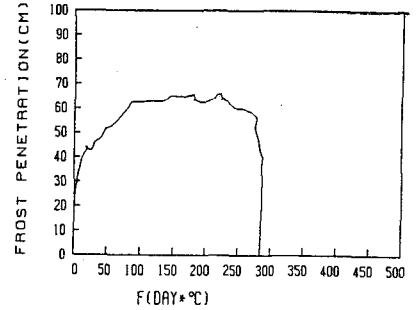


図-5 凍結指数と凍結深さ

図-6に凍上量を予測した結果を示した。凍結深さが粘性に達するまで凍上は起らないとして計算した。そのため実測値に較べ凍上の起り時期はずれがあった。

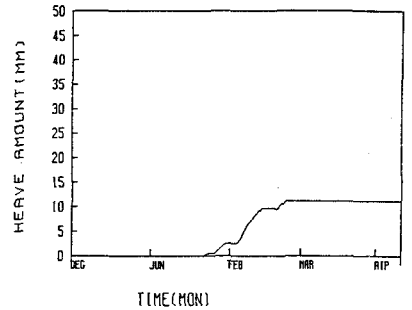


図-6 時間と凍上量

4. あとがき 本研究は、道路の凍上対策のために、凍結深さと凍上量を予測することが目的である。凍結深さは、道路の舗装構造および、地盤の状態を知ることができれば、現実に近い値を予測できることがわかった。しかし、凍上量の予測については今後、更に検討を必要とする。

参考文献 1)凍土の物理学

木下誠一著

2)土の凍結-その制御と応用

土質工学会編