

PSIII-8

冷却速度を考慮した舗装道路の凍結深の予測

東北大学 正員 ○姚 義久
同 正員 柳沢栄司

1・まえがき

舗装道路の凍結深の算定に用いられているAldrichの式では、一般に気温から求めた凍結指数を使っているが、地域によっては実測と一致しない事例も多い。土の凍結深の影響に及ぼすファクターは非常に複雑であるが、凍結指数や凍結期間が同一であっても冷却速度により、凍結深が異なることがある。ここでは特に冷却速度 v に着目し、 $v = T_{max}/t_1$ と定義する。 T_{max} は凍結期間における最低気温であり、 t_1 は凍結始点から T_{max} までに達する時間である。本研究ではこの冷却速度という因子を取り入れて熱的性質の異なる多層構造を有する舗装道路について気温を地表面温度としてその時刻歴をフーリエ級数で表現した場合の各層内の温度分布を求める近似解法により、凍結面位置が決定されるので、この手法を用いて様々な温度条件における凍結深の予測が可能である。この予測値に基づいて、凍結深を求める経験式をここに提案する。

2・熱伝導解析

2・1 熱的性質

舗装道路における凍結の問題は本来非線形の熱伝導問題であるが、数値解析にあたっては、含水比の変化や凍結に伴う舗装各層の材料の熱的性質、即ち熱伝導率、熱容量、潜熱、温度拡散率の変化を知っておく必要がある。しかし、実用的には、このような相変化を考慮して熱定数を求め、線形問題として解けばある程度の精度で凍結深の予測が可能であることは既に報告¹⁾した通りである。線形熱伝導解析には温度拡散率 α が必要であり、この α は具体的な例として青森県の実測データのある地点の道路構造について含水比を考慮した k_{eff} より求めた結果¹⁾は $\alpha = 543 \text{ cm}^2/\text{day}$ である。

2・2 有限フーリエ近似解析法²⁾

等間隔に離散化して記録した標本値を使って、曲線を近似的に表わし、元の曲線を再現する方法を有限フーリエ近似と呼んでいる。この手法により、元の地表面波形がsin波とcos波に分解されることができるので、ある時刻 t における深さ方向 Z の温度分布 $\theta(t, Z)$ ¹⁾は

$$\theta(t, Z) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} [A_k e^{-a_k \cdot Z} \cos(\omega_k t - a_k \cdot Z) + \frac{A_{N/2}}{2} e^{-a_{N/2} \cdot Z} \cos(\omega_{N/2} t - a_{N/2} \cdot Z) + B_k e^{-a_k \cdot Z} \sin(\omega_k t - a_k \cdot Z)] \quad (1)$$

と書ける。この $a_k = \sqrt{\omega_k / (2\alpha)}$ であり、式(1)は有限フーリエ近似解による地中温度分布である。

3・解析結果及び考察

3・1 冷却速度を考慮した凍結深に及ぼす影響

冷却速度を考慮した凍結深に及ぼす影響を確かめるため、まず表-1に示すような温度条件で気温データを作っておいて、式(1)から温度分布を求めることにより最大凍結深 ξ_{max} を決定した。これより修正比 $\eta = \xi'_{max} / \xi_{max}$ と冷却速度 v の関係を示すと図-1のようになる。 ξ_{max} はAldrichの定義であり ξ_{max}

表-1 冷却速度による最大凍結深

凍結指数 $T \cdot \text{day}$	凍結期間 day	最大凍結深 ξ_{max} cm	Aldrichの 最大凍結深 ξ_{max} cm	ξ'_{max} / ξ_{max}
200	100	70	63.9	1.095
	110	61	62.8	0.971
	120	59	61.4	0.961
	130	52	59.5	0.874
300	100	101	85.6	1.180
	110	90	84.0	1.071
	120	85	82.4	1.032
	130	77	81.0	0.951

(ただし、 $v = 0.2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{day}$, $C_2 = 9.0 \text{ }^\circ\text{C}$)

は v の効果考えた凍結深である。全体的な傾向として凍結指数や凍結期間が同一であっても η は v が大きくなるに従って小さくなるが、凍結指数の小さい方が小さい。一方図-2に示すように同じ v に対して同じ凍結指数でも η は凍結期間が大きくなるに従って小さくなるが、凍結指数の小さい方が小さい。即ち、凍結指数が大きいほど、凍結期間や冷却速度が小さい方が、凍結深に及ぼす影響は著しくなる。要するに冷却速度は凍結深に大きな影響を与えることは明らかである。

3・2 凍結深を求める経験式の提案

Aldrich の式では凍結深は熱的性質のほか凍結指数 F 、凍結期間 t 、年平均気温 C_2 などの関数であるが、冷却速度を取り入れることにより図-1に示すような傾向になる。従って、冷却速度 v と修正比 η の関係は近似的に次式のように表わすことができる。

$$\eta = \frac{P}{v} + Q \quad (2)$$

P 、 Q はいずれも F 、 t 、 C_2 の関数であるが、 $F=300$ 前後の場合、 $\Delta C_2 = 0.5$ ℃による η の差は3%以内であることを確かめたので、一応この差を無視して $C_2 = 9$ ℃について数値解析により、 P 、 Q は次のように求めた。

$$P = 0.000131F - 0.000427t + 0.041 \quad (3)$$

$$Q = 0.000458F - 0.005670t + 1.427 \quad (4)$$

3・3 計算値と実測値の比較

提案式(2)、(3)、(4)の妥当性を評価するため、青森県内の6か所を選んで実測値と計算値を表-2に示す。これより提案式の値はほぼ実測値とフーリエ級数解の値の間にあり、またはフーリエ級数解の値に近いという結果を得た。従来、Aldrich の値として特に凍結指数の小さい場合、凍結深を小さ目に算出する傾向が多いが、本提案式による修正は一応より良い近似が得られたことをもって提案式の妥当性を評価した。

4・あとがき

以上、冷却速度というファクターを取り入れることによる凍結深の解析法について述べ、経験式を提案し、実例を示した。これは凍上を無視した場合についての結果であるが、今後、特に凍上を考慮した凍結深に及ぼす影響について研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 姚，柳沢：最低気温を考慮した舗装道路の凍結深さの予測，第23回土質工学研究発表会(1988,6 予定)
- 2) 大崎：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1987, pp43~82

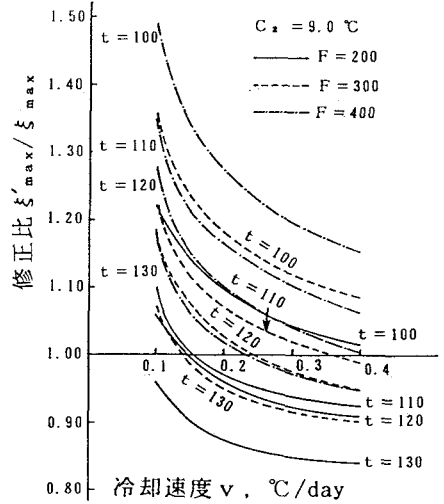


図-1 冷却速度と修正比の関係

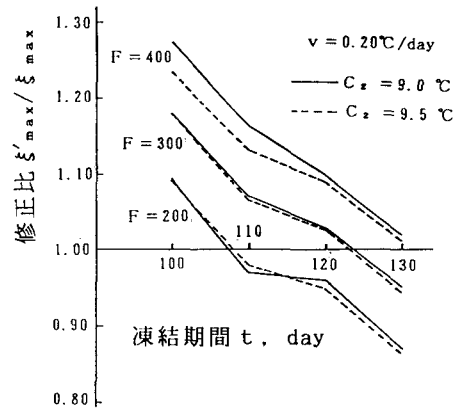


図-2 凍結期間と修正比の関係

表-2 最大凍結深の実測値と計算値

測点	最大凍結深 . cm		計算値		冷却速度 °C/day	最低気温 °C	凍結指数 °C·day	凍結 期間 day
	実測値	計	フーリエ級数解	Aldrich 式 提案式				
市川	98.4	115	90.2	107.4	0.20	9.38	318.7	102
崎本坂	99.0	100	86.5	99.2	0.15	8.36	313.9	114
戸山	75.0	100	74.8	91.2	0.15	8.50	252.3	96
カ瀬	90.0	115	96.2	119.9	0.16	8.68	357.5	112
木の下	95.7	115	91.0	102.1	0.15	9.86	353.0	123
水赤	124.1	135	106.7	139.6	0.18	10.65	487.5	115