

アスファルト舗装体の温度に関する調査研究

INVESTIGATIONS OF TEMPERATURE IN BITUMINOUS PAVEMENT

秋 山 政 敬*

By Masayuki AKIYAMA

1. ま え が き

アスファルト舗装の輪荷重に対する挙動は主として弾性理論によって展開している。この挙動に直接関連する基礎的要素事項の一つとして活用するにはアスファルト舗装体の温度とくに変化の激しいアスファルト層の温度を的確に把握しておく必要がある。しかしながらアスファルト層の温度に関する詳細な報告はあまりにも少ない。本報告は東京都土木技術研究所構内に設けた実物大のアスファルト舗装体の温度を主体に調査研究を行いまとめたものである。

アスファルト層の温度分布に関する既報の調査研究例としては代表的なものに Asphalt Institute⁴⁾ の調査がある。これによればある一定時刻におけるアスファルト層の表面温度に5日間の平均気温を加えた温度と層厚別の温度の関係はすべて直線関係をもって示されるといふ。また、ある一定アスファルト層厚の一定深さにおける温度と平均舗装温度との関係は月別にそれぞれ直線関係にあるとしている。しかし、表面温度と気温は雨天以外は比例しないので、層内温度は当然比例しない結果になるし、また、月別の一定した平均温度として扱っていないところに問題があり、まして舗装設計に直接適用される代表温度となり得ないものと考える。Barber⁵⁾ は気象データを利用して舗装温度を算出し、気温と舗装温度の関係を求めている。これによるとアスファルト層の表面温度と気温の関係において測定値と計算値とがある程度一致することを示しているものの、相当大きなばらつきも見られるところに問題がある。

一方、わが国における調査研究として松野¹³⁾ のアスファルト層厚 10 cm までの測定結果(昭和 36 年)や太田¹⁴⁾ らの北海道(幕別など)における層厚 10 cm までの測定結果(昭和 41 年 1 月~42 年 12 月)などがあ

る。しかし、これらの調査を初めとして、データが断片的であり、かつ気温、表面温度と層内温度を年間にまたがって同時測定を行っておらず、データ不足のため月別の代表温度を求める資料となり得ないものである。

このため、著者はアスファルト層の弾性係数(変形係数)²¹⁾ が温度によって著しく異なることにかんがみ、年間における温度の履歴現象を把握し、舗装設計に適用する好ましい温度として各月別の層内平衡点温度を求めた。そのため気温と表面温度の関係、表面温度と層内最高温度の関係を求め、同時に砕石層ならびに路床の温度をも求めた。また、表面温度の変化に対応した層内温度を算出することができれば便利であり、層厚別に温度変動を求め得るアスファルト層独自の補正理論式を導いた。この理由は従来的一般理論式がアスファルト層の温度変動を求めるのに適合しないからである。

このように、現場におけるアスファルト層の温度を詳細に求めておくことは室内強度試験時の供試体の温度との対比ができるのみでなく、舗装の実態調査およびその評価にも役立つものと考えられる。

2. 気温、表面温度ならびに層内温度の変化と相互の関係

(1) 調査対象ならびに調査方法

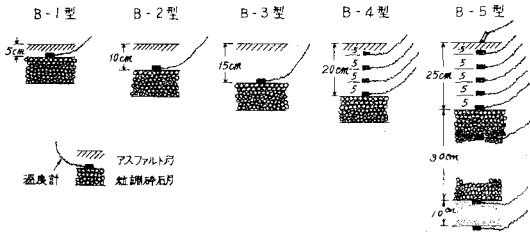
アスファルト層の温度を実際に工学面で適用するには気温変化に対応した表面温度および層内温度の変化を調査し、それぞれ相互の関係を求め、これより月別の代表温度とみなし得る層内温度をきめることである。また、層内温度は時刻や月別によって異なるのみではなく、層厚によっても異なるので、年間にまたがって層厚別に求めることにする。

アスファルト層厚は交通荷重によって通常 5~25 cm 厚に設計されるので、測定のためのアスファルト層厚を

* 正会員 東京都建設局道路建設部

表—1 アスファルト混合物の粒度組成

種 別	ふるい目	25.4	19.1	12.7	4.76	2.38	0.59	0.297	0.149	0.074	アスファルト量
細粒アスファルトコンクリート2号	—	—	—	100-0	64±7	46±6	22±6	15±4	10±3	7±2	6±0.5
粗粒アスファルトコンクリート2号	100-0	95±5	75±7	49±6	34±6	17±5	11±4	7±3	4±2	5±0.5	



図—1 層厚と温度計挿入位置

5, 10, 15, 20, 25 cm 厚に分けて粒調砕石層上に舗設した。図—1 は舗装構造とサーミスター温度計の埋設位置を示しており、年間にまたがって(1967~1968, 東京地域)2時間間隔に、気温、表面温度ならびに層内温度の同時測定を行った。なお、アスファルト層に採用したアスファルト混合物は密粒度型に属する部規定の細粒2号および粗粒2号であり、細粒2号は5cm, 10cm厚に上層部へ、粗粒2号は10cm厚以上の構造の下層部へ設けた。

(2) 気温ならびに表面温度の関係

アスファルト層の層内温度を求めるにあたり、気温および表面温度の変化を知る必要がある。図—2 は年間月別の平均気温(晴天時および曇天時)の日変化について2時間間隔に示しており、8月を最大、2月を最小として変動している。図—3 は同様表面温度について示しており、気温変化と同様な傾向を生じている。これらの温度変化において10°C内外のとき最も層内温度変動幅が小さく(後述)安定状態にあり、月別ではほぼ3月、11月がこの時期にあたる。

これらの年間のデータより、気温と表面温度の関係を求めると図—4 のようになる。これによると両者の関係は晴天、曇天、雨天にかかわらずほぼ気温18°Cまで直線関係にあり、そのときの表面温度はほぼ21°Cにあたる。表面温度=y(°C)、気温=x(°C) とすると

晴天および曇天の場合

$$y = 1.100x + 1.500 + 0.170e^{0.126x} \dots\dots\dots (1)$$

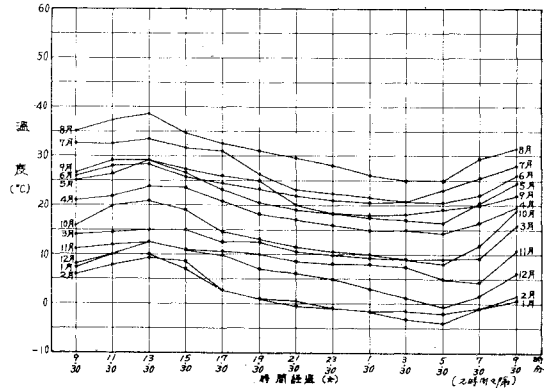
雨天の場合

$$y = 1.233x + 0.833 \dots\dots\dots (2)$$

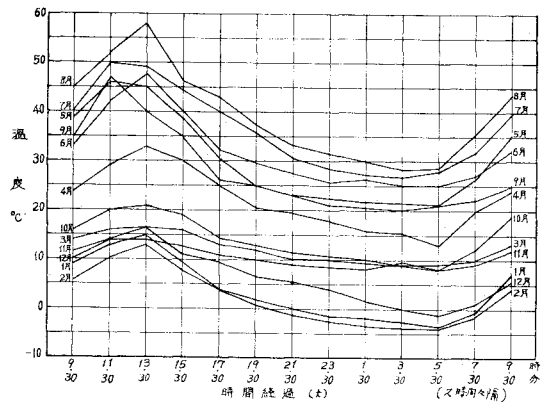
のようになる。

(3) 表面温度ならびに層内温度の関係

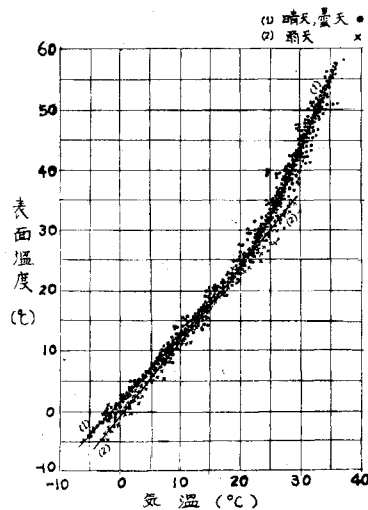
アスファルト層は表面に近いほど気温の影響が大きく、表面から遠ざかるにしたがって小さくなる。例とし



図—2 気温



図—3 表面温度



図—4 表面温度-気温

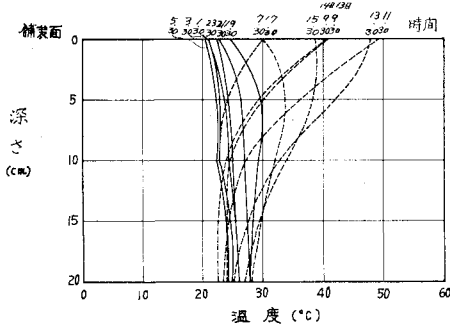


図-5 深さと温度

て図-5 は昭和 42 年 5 月 13 日～14 日における一昼夜の温度と深さの関係を示したもので 11～12 時をピークとし、13 時を経過すると“温度伝播の遅れ”によって表面温度が下降にさしかかり、そのとき深度方向の温度が高くなってくる（図-5 の点線、実線は時間経過によって表面温度と層内温度の反転状態を見易くしたものである）。この温度収束幅は深くなるほど縮小しており、温度収束率 P は次式から求められる（図-5 の場合 $P \approx 0.6$ である）。

$$P = \theta_{x \max} e^{-\sqrt{\pi/KT} \cdot x} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\theta_{x \max}$ ：深さ x cm における調和振動的変動温度の最大振幅 (°C)、 x ：アスファルト層の深さ (cm)、 K ：温度伝導率 (cm²/sec)、 T ：振動周期 (sec)

アスファルト層の層内温度変化と表面温度変化の関係はほぼ長円形を形成し、層厚の小さいほど長円面積は大きく、温度変化の度合が大きい。図-6 は一昼夜におけるこの一例である。この温度関係の長円形について、年間の月別平均的なものを各層厚別に示したのが図-7、8 である。これら長円面積は温度変化の相対的大きさを、その傾斜度は表面温度変化に対応する層内温度変化の変化尺度の大きいことを示している。月別には 3 月、11

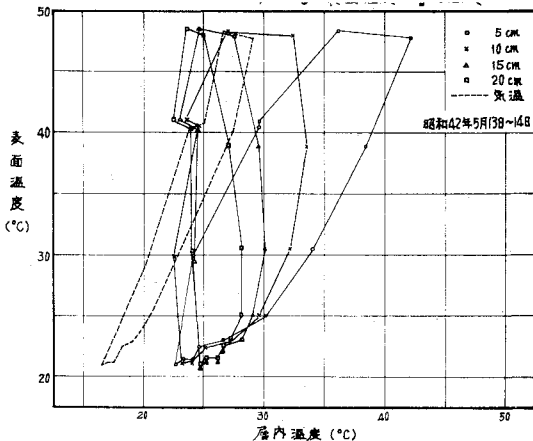


図-6 表面温度と層内温度

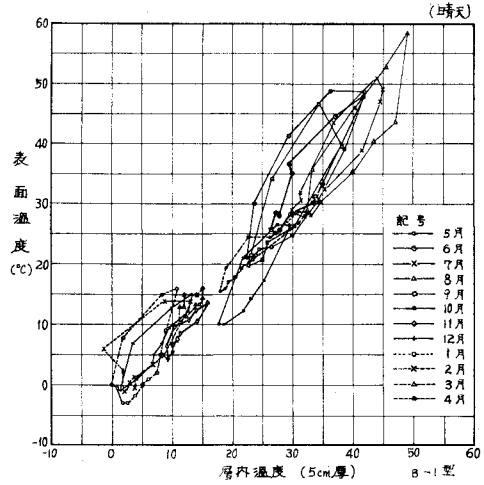


図-7 表面温度と層内温度

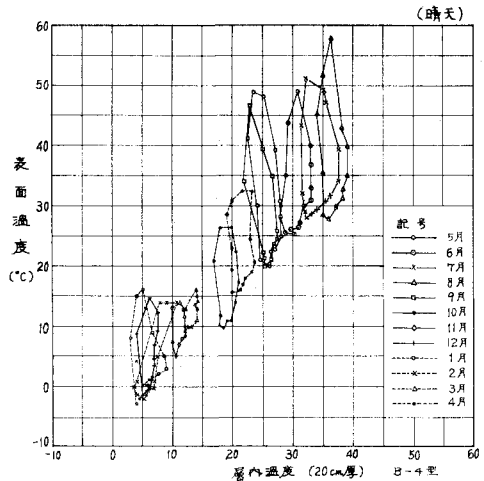


図-8 表面温度と層内温度

月がより安定した状態にあり、1 月、2 月に比べてその面積の小さいのは昼夜の寒暖の差が小さいためである。図-9 は同様、晴天、曇天、雨天時の差がわかるように、層厚 20 cm および 5 cm の場合について示している。これによると長円面積は晴天時に比べて曇天時には縮小しており、雨天時にはさらに縮小している。また、夏季に比べて気温の低い冬季においては晴天時と曇天時の差が小さい。

これらの年間にまたがるデータより層内最高温度と表面温度の関係を求めると 図-10 のようになり、各層厚別に、月別にかかわらず直線関係となる。

層内最高温度= y (°C)、表面温度= x (°C) とすると、各層厚別に次のようになる。

層厚 25 cm のとき $y = 0.802x + 1.702 \dots \dots (4)$

層厚 20 cm のとき $y = 0.804x + 1.401 \dots \dots (5)$

層厚 15 cm のとき $y = 0.854x + 0.688 \dots \dots (6)$

層厚 10 cm のとき $y=0.918x+0.303$(7)

層厚 5 cm のとき $y=0.980x+0.798$(8)

となり、 $y=mx+b$ の一般式ですべて表わされる。

次に、これら層厚と勾配係数 (m) との関係を求めると 図-11 のようになり、勾配係数は層厚 20 cm 以上ではほとんど一定であり、20 cm 以下では相対的に大きく

なる。すなわち、薄層のものほど層内温度変化が大きくなり、不安定な温度状態を呈することが定量的に示されたことになる。

(4) 粒調碎石層の温度ならびに路床面の温度の変化

年間における粒調碎石層 (深さ 25 cm) 上面における日変化温度の各月別平均値の最大は 5°C 程度で余り大きな変化をしない。また年間の変化幅は夏季 8 月の 35~37°C を最高、冬季 2 月の -2°C を最小とし、両者の温度差は約 40°C にも達する。また、温度変動は深度が大きくなるほど小さくなっており、太陽エネルギーの影響の減少によるもので、4. の温度変動の計算例からも明らかである。

次に、路床面上 (深さ 55 cm) における日変化温度の各月別平均値は 8 月の約 27°C を最高とし、2 月の約 4°C を最低としており、両者の温度差は 23°C を最高とするも、月別にはほとんど終日一定である。このうち 2 月においては粒調碎石面よりも高い温度を示していることは特記すべきことである。また、各月とも終日ほとんど温度変化のみられないのは粒調碎石層の場合と同様な理由によるものである。

図-12 はアスファルト舗装の層内温度、表面温度および気温の最大、最小値を深度別に示したものであり、

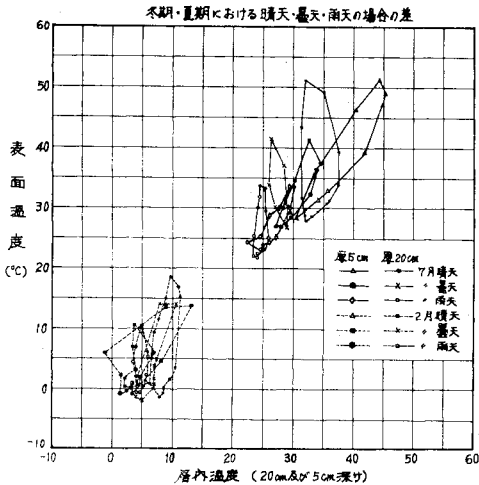


図-9 表面温度と層内温度

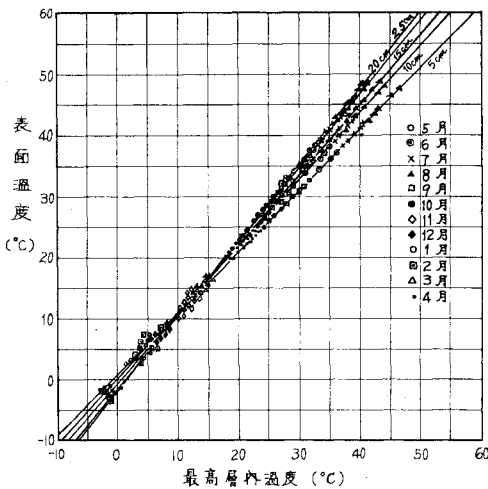


図-10 表面温度-最高層内温度

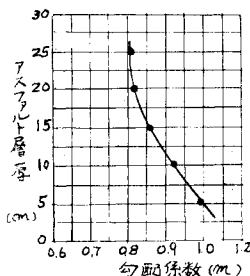


図-11 厚さと勾配係数

(アスファルト層厚 25 cm)

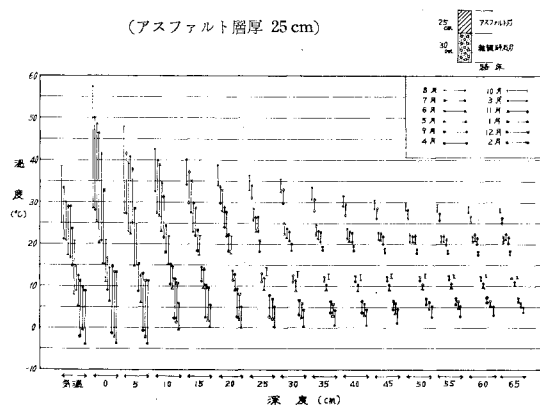


図-12 舗装体深度別最高最低温度 (月別)

これによって年間各月別のおおよその温度状態を推定することができる。層内温度の変動幅は深度が増すにしたがって縮小しており、特に冬季においては深さ 30 cm 以上では下層の方が上層よりも最小温度が高い。このことは凍結深などを検討するようとき考慮すべき事項と考える (付図-A, B 参照)。

3. アスファルト層の平衡点温度

アスファルト層は輪荷重、交通速度および層内温度などによってその力学的挙動を異にすることが知られてい

る。このうち層内温度は最近の舗装設計に適用され始めたばかりの重要な基礎的要素事項の一つとして必要欠くべからざるものとなってきている。それはアスファルト層の温度差によってその弾性係数（変形係数）に著しい差を生ずるからである。このようにアスファルト層の強度を論ずるには最も合理的な温度はどの点の温度をもって代表温度とすべきか決めなければならない。

温度条件の取り入れ方についてはおのずから寒冷地域と温暖地域とは異なった温度を採用すべきであり、地域的な代表温度として層内温度の選定が必要であると考える。

アスファルト層の温度は表面と深部とは著しく異なっており、一日の温度変化において深部から表面に近づくにしたがってかなり激しいものとなっていることはすでに述べたとおりである。そのためアスファルト層の強度を決めるときに温度条件を何度にとるかは単純な算術平均によって決められるものではないと考えた。そこで層全体からみたアスファルト層の平均的な層内温度として表し得る合理的な温度を考え、これを平衡点温度と称すことにする。

Asphalt Institute の研究について考察すると、ある

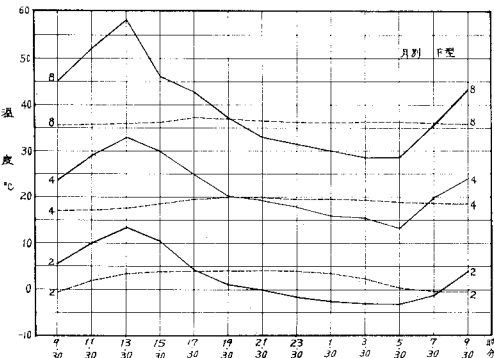
一定時刻の表面温度と層内温度の関係が直線関係にあることを示すもので、一定した点として扱っている平均温度を表わしているものでもない。また、月別のデータも両温度の関係が直線関係にあることを示しているに過ぎない。まして、設計などに直接適用できる代表温度を示しているものでもない。

また、わが国と米国とは気象現象にも相当の差があり、Asphalt Institute のデータをそのままわが国のアスファルト層の温度として直接適用できるものでもないと考えられる。

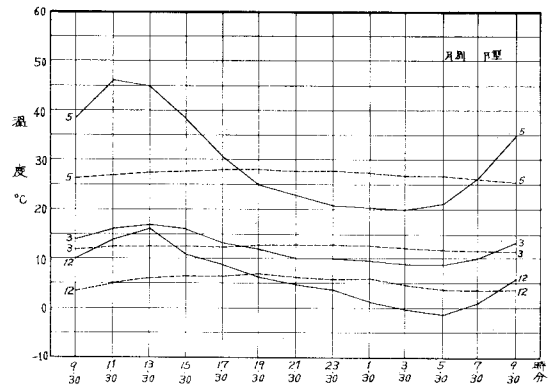
ここに、層厚別、月別、地域別に、平衡点温度を求める必要があることがいえる。

(1) 平衡点温度の求め方

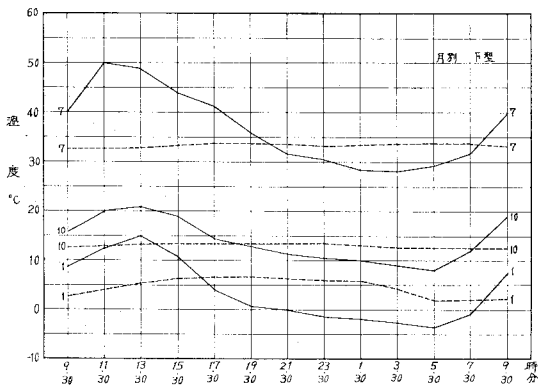
図一13~16（実線は表面温度、点線は底面温度を表わす）に示したように平均的な温度として表現し得るようアスファルト層底面の温度の日変化の平均値を基準にして対応する表面温度の日変化の平均値を月別に累積平均して求めた値から平衡点温度（単位時間当たり）を求める。



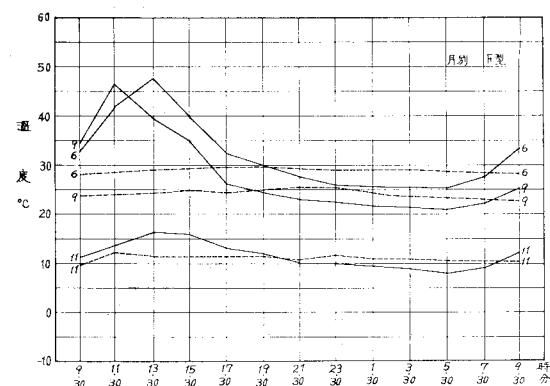
図一13 アスファルト層の表面および下面の温度変化（厚さ 25 cm）



図一15 アスファルト層の表面および下面の温度変化（厚さ 25 cm）



図一14 アスファルト層の表面および下面の温度変化（厚さ 25 cm）



図一16 アスファルト層の表面および下面の温度変化（厚さ 25 cm）

また、月別平衡点温度は 図-17 から単位時間当りの底面温度を基準にしてこれより高い温度を +, 低い温度を - として求めると 図-18 が得られる. この図において符号温度 +, 温度 - の長さはそれぞれの大きさを示しており, この両者を結んだ交点はほぼ層内温度の平衡点を示すことになる. ここで, 温度 + と温度 - の大きさの差が小さいほど安定した層内温度状態にあることを示している. 図-19 はアスファルト層厚別に, 各月別の平衡点温度を示している. 表-2 は平衡点温度の関連項目を示すものである.

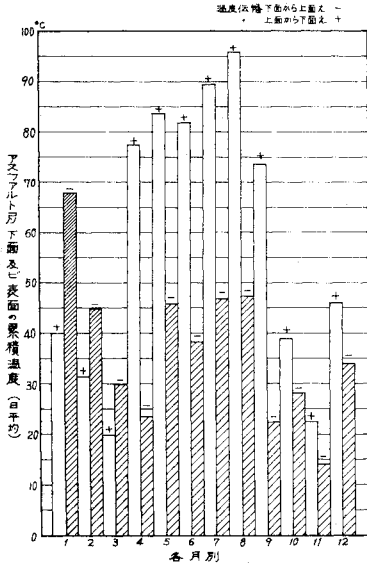


図-17 アスファルト層表面, 下面の累積温度 (日平均)

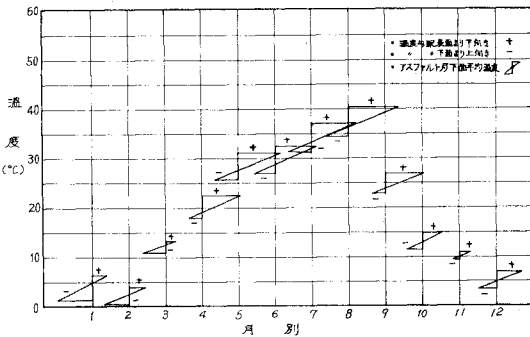


図-18 アスファルト層内温度 (アスファルト層厚 25 cm) 時間当り月別

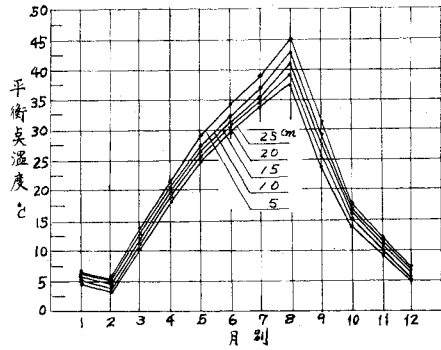


図-19 平衡点温度 (月別)

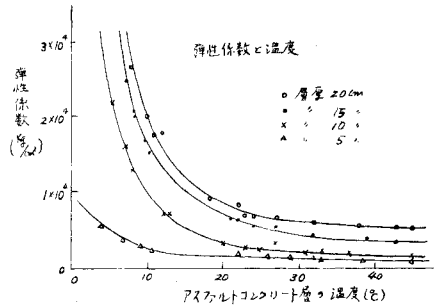


図-20 弾性係数と温度

(2) 平衡点温度の必要性

交通荷重下のアスファルト層は温度によって力学的挙動を著しく異にする. 著者も文献 21) に示しているようにアスファルト層の弾性係数 (変形係数) はその温度と層厚によって著しい差を生ずるものである. したがって 図-20 に示しているように大きな差を生ずることになるから設計に適用する合理的な一定温度をきめなければならないことになる. その時の温度のとり方によって現実と著しく異なった弾性係数 (変形係数) をきめてしまうことになりかねない. また文献 22) に示しているようにアスファルト混合物の圧縮強度は試験温度によって著しい差があり, 室内試験温度をどの点にとって現場適用温度として反映させるべきかをきめる必要がある.

一例として, 平衡点温度の適用を考えてみる. 図-19 より月別の平衡点温度を平均した平衡点温度 (最大温度, 最小温度点を基線にして面積平均した温度) を求めると, 層厚 20 cm の場合ほぼ 14.85°C となり, 図-20

表-2 平衡点温度と関連項目

月 別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
+ 温度 勾配	+40.0	+32.5	+20.0	+77.5	+83.5	+82.0	+89.5	+96.0	+73.5	+39.0	+22.5	+47.0
- 温度 勾配	-68.0	-45	-30.0	-23.5	-46	-38.5	-47.0	-47.5	-22.5	-23.5	-14.0	-34.0
計 (絶対値)	108.0	77.5	101.0	101.0	129.5	120.5	136.5	143.5	95.0	67.5	36.5	81.0
1時間当り偏差+	+1.7	+1.4	+0.8	+3.2	+3.5	+3.4	+3.7	+4.0	+3.1	+1.6	+0.9	+2.0
1時間当り偏差-	-2.8	-1.9	-1.3	-1.0	-1.9	-1.6	-1.9	-2.0	-0.9	-1.2	-0.6	-1.4
平衡点温度	4.0	3.0	12.0	20.0	28.0	30.0	34.0	37.5	26.0	13.0	10.0	5.5

によって対応する弾性係数(変形係数)を求めると約 13 000 kg/cm² となる。

(3) 平衡点温度の利点

平衡点温度の利点としては舗装体温度を考慮する際、以下の各項についての適用の可能性をもつことがいえる。

① 現場におけるアスファルト層の平衡点温度に対応させた室内強度試験の温度をきめることができ、試験結果を直接舗装構造の設計に適用することを可能にするものとする。

② 気温ないし層内温度は地域別に異なるものであり、その代表温度として求めた平衡点温度を適用することにより、地域的な特徴を生かすことを可能にするものとする。

③ 層内温度は常に変化しているものであるが、平均化した固定温度として扱ったことになるので、設計に適用する代表温度とすることを可能にするものとする。

④ 設計に適用する場合、その地域の平衡点温度の年間最高、最低温度の設計へ適用を試みてみることにより設計構造のチェックをも可能にするものとする。

4. アスファルト層の層内温度を求める式

アスファルト層の表面温度から層内温度変動を求める式は未だ明確に求められていない。これを求めることは便利であるとともに、舗装設計に適用する温度の正確性を期するうえでも重要である。

(1) 半無限固体の温度変動を求める式

アスファルト層の温度を求める式の誘導にあたり、半無限固体温度は、半無限固体の表面温度を $\theta_0(^{\circ}\text{C})$ 、その任意深さ (x cm) における層内温度を $\theta_x(^{\circ}\text{C})$ 、温度伝導時間 t (sec) とし、最初層内温度 ($^{\circ}\text{C}$) を任意関数 $f(x)$ で表すと川下によれば理論式 (9)^{12), 13)} が得られる。

$$\theta_x = A e^{-\sqrt{\omega/2K} \cdot x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2K}} \cdot x\right) \dots\dots (9)$$

ここに、 K (cm-gr/sec², $^{\circ}\text{C}$): 熱伝導率

C (cm²/sec², $^{\circ}\text{C}$): 定積比熱

ρ (gr/cm³): 密度

π (cm²/sec) = $K/C\rho$: 温度伝導率

ここで表面温度 θ_0 は

$$\theta_0 = A \cos \omega t = \theta_{0 \max} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

とおけるから、層内温度 θ_x は

$$\theta_x = \theta_{0 \max} e^{-\sqrt{1/K \cdot \pi/T} \cdot x} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \sqrt{\frac{1}{K} \cdot \frac{\pi}{T}} \cdot x\right) \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 θ_0 : 表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 t : 時間 (sec)、 $\theta_{0 \max}$: 表面温度の定常的周期変動における振幅の最大値 ($^{\circ}\text{C}$)、 T : 表面温度の定常的周期変動における周期 (1 日/sec)

上式における最大振幅 $\theta_{x \max}$ の変化について検討を加えるとその変化は余弦曲線をなし、次のように表わされる。

$$\theta_{x \max} = \theta_{0 \max} e^{-\sqrt{1/K \cdot \pi/T} \cdot x} \dots\dots\dots (11)$$

上式において、層内温度変動における振幅は深さ x (cm) が増すにしたがって減衰し、一定深さ以上になるときわめて小さくなってしまふ。ここで $\theta_{x \max}$ が $\theta_{0 \max}$ の 1/1 000 になる深さを求めてみる。例として、B-5 型構造(図-1 参照)のように粒調砕石層の温度変化の振幅の大きさが 1/1 000 になる深さ x (cm) を求めると、

$$x = \theta_{x \max} / \theta_{0 \max} \sqrt{K \cdot T} = 3.888 \sqrt{0.00119 \times 86400} = 39.4243 \approx 40 \text{ (cm)}$$

となる。このことはすでに述べた実測結果からも明らかである。

(2) アスファルト層の温度変動を求める式

アスファルト層の層内温度 $\theta_x(^{\circ}\text{C})$ はアスファルト層厚 x (cm)、温度伝導時間 t (sec)、温度伝導率 K (cm²/sec)、および変動周期 T (sec) に関係し、熱源である気温の大小によって異なる。また、アスファルト層厚は有限であり、下層には温度伝導率の異なる路盤や路床が存在するのでアスファルト層厚や層配置などによって周期的変動温度の補正を必要とする。そのため、年間月別気温に対応でき、実測値にマッチした実験式を求める。

いま厚さごとの温度変動を示すと以下のごとくになる。

$$x = 0 \text{ cm のとき } \theta_0 = 14.0000 \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

$$x = 5 \text{ cm のとき } \theta_5 = 8.4914 \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - 29^{\circ}\right)$$

$$x = 10 \text{ cm のとき } \theta_{10} = 5.1500 \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - 58^{\circ}\right)$$

$$x = 15 \text{ cm のとき } \theta_{15} = 3.1100 \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - 87^{\circ}\right)$$

$$x = 20 \text{ cm のとき } \theta_{20} = 1.8950 \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - 115^{\circ}\right)$$

そこで式 (9) による t (sec) と $\theta_x(^{\circ}\text{C})$ との関係を数値で示すと表-3 のようになる。一方、実測に適合した t と θ_x との関係を示すと表-4 のようになる。図-21 は表-3 の理論温度変動を点線で、表-4 の補正理論温度変動を実線で示したものである。ここに、 $\theta_{0 \max} = 14.0^{\circ}\text{C}$ 、 $K = 2.32 \times 10^{-3}$ (cm²/sec) としている。

次に、理論式と補正理論式との関係において、表面温度の実測値 θ_{\max} と、温度変動補正係数 n 値との間には

$$\theta_{\max} = \theta_{0 \max} / 2 + n/5 \dots\dots\dots (12)$$

表-3 経過時間と深さごと温度変化

t	θ_0	θ_5	θ_{10}	θ_{15}	θ_{20}
0	14.0	7.1	2.7	0.5	-0.8
2	12.1	8.5	4.5	2.0	0.02
4	7.0	0.73	5.1	2.9	1.1
6	0.0	0.41	4.4	3.1	1.7
8	7.0	-0.1	2.4	2.4	1.9
10	-12.1	-4.4	-0.2	1.4	1.6
12	-14.0	-7.4	-2.7	-0.5	0.8
14	-12.1	-4.5	-2.0	-2.0	-0.02
16	-7.0	-5.1	-2.9	-2.9	-1.1
18	0.0	-4.4	-3.1	-3.1	-1.7
20	7.0	-2.4	-2.4	-2.4	-1.9
22	12.1	0.2	-1.4	-1.4	-1.6
24	14.0	2.7	0.5	0.5	-0.8

表-4 経過時間と深さごと温度

t	θ_0	θ_5	θ_{10}	θ_{15}	θ_{20}
0	24.0	12.4	6.0	3.0	1.2
2	24.3	13.1	7.6	4.3	1.8
4	15.3	11.5	7.9	5.0	2.8
6	7.5	7.9	6.9	5.0	3.2
8	-0.3	3.2	4.6	4.1	3.2
10	-6.3	-1.5	1.7	2.9	2.8
12	-9.0	-4.9	-1.0	0.8	1.8
14	-7.9	-6.4	-3.1	-1.0	0.8
16	-3.7	-5.6	-4.0	-2.1	-0.4
18	2.5	-2.6	-3.6	-2.0	-1.2
20	8.7	0.9	-1.8	-2.0	-1.0
22	12.9	4.8	0.5	-1.2	-1.4
24	14.0	7.4	2.7	0.5	-0.8

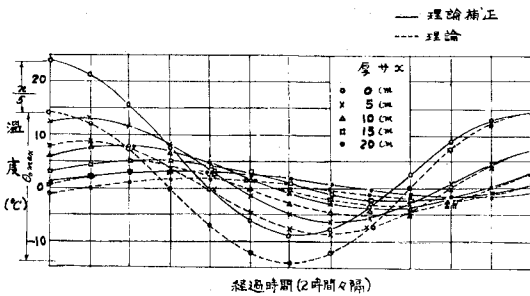


図-21 温度変動曲線

の関係が成立することが認められたので、アスファルト層の任意深さの温度 θ_x は次式となる。

$$\theta_x = \theta_{0\max} e^{-\sqrt{\pi/KT} \cdot x} \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \sqrt{\frac{\pi}{KT}} \cdot x\right) + \frac{n}{x+5} \left(\frac{T-t}{T}\right) \dots\dots\dots (13)$$

(3) 温度変動補正係数 n 値

アスファルト層の温度は固有のものであり、補正理論式を満足する月別の温度補正係数 n 値を求めてみる必要がある。式 (12) を書きかえると

$$n = 5\theta_{\max} - 2.5\theta_{0\max} \dots\dots\dots (14)$$

この式 (14) より各月別かつ各厚さごとに n 値を求めると表-5 および 図-22 が得られる。これらによると層厚さ別ならびに月別によって著しく異なり、夏季8月と冬季2月で著しく差がある。また、表面よりの深さが増すにしたがって n 値は小さくなる。また、温度変動補正係数 n 値は地域別に気温が異なるので当然地域別に異なる値となる。そこで気象庁年報 (1971 年) の利用がほぼ可能といえることよりわが国の中心としての東京、寒冷地の代表としての青森、温暖地の代表としての鹿児島

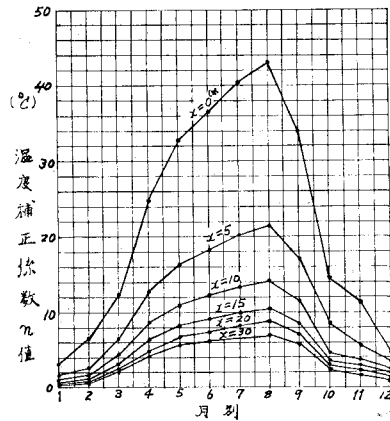


図-22 月別温度補正係数 n 値 (深さ別)

表-5 月別温度補正係数 n 値 (深さ別)

項目 月別	θ_{\max}	θ_{\min}	$\theta_{\max} - \theta_{\min}$	$\theta_{0\max}/2$	$\theta_{0\max} - \theta_{0\max}/2$	$n/5$ ($x=0$)	$n/10$ ($x=5$)	$n/15$ ($x=10$)	$n/20$ ($x=15$)	$n/25$ ($x=20$)	$n/30$ ($x=25$)
1	10.00	-3.50	13.50	6.75	3.25	3.25	1.63	1.08	0.81	0.65	0.53
2	13.00	-4.00	17.00	8.50	4.50	4.50	2.25	1.50	1.13	0.90	0.75
3	16.50	9.00	7.50	3.75	12.75	12.75	6.38	4.25	3.19	2.55	2.10
4	32.50	18.00	14.50	7.25	25.25	25.25	12.63	8.42	6.31	5.05	4.21
5	46.00	20.00	26.00	13.00	33.00	33.00	16.50	11.00	8.25	6.60	5.50
6	47.50	25.00	22.50	11.25	36.25	36.25	18.13	12.08	9.06	7.25	6.04
7	56.00	26.50	31.50	15.75	41.25	41.25	20.63	13.67	10.25	8.20	6.83
8	58.00	28.00	30.00	15.00	43.00	43.00	21.50	14.33	10.75	8.60	7.16
9	46.50	21.50	25.00	12.50	34.00	34.00	17.00	11.33	8.50	6.80	5.67
10	20.50	8.00	12.50	6.25	14.25	14.25	7.13	4.75	3.56	2.85	2.38
11	15.00	8.00	7.00	3.50	11.50	11.50	5.75	3.83	2.88	2.30	1.25
12	14.00	-1.00	15.00	7.50	6.50	6.50	3.25	2.17	1.63	1.30	1.08

n : 補正係数 ($^{\circ}\text{C}$), x : 深さ (cm)

表-6 気 温 (°C)

(気象庁年報)

月 別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年	
東京	平均気温	4.1	4.8	7.9	13.5	18.0	21.3	25.2	26.7	23.0	16.9	11.7	6.6	15.0
	最高平均	9.4	9.9	12.8	18.4	22.6	25.3	29.2	31.0	27.0	21.1	16.4	11.8	19.6
	最小平均	-0.4	0.4	3.5	9.1	14.0	18.0	22.1	23.5	19.7	13.5	7.7	2.3	11.1
青森	平均気温	-2.0	-1.7	1.3	7.6	13.0	16.6	20.9	22.6	18.1	11.8	6.3	0.6	0.6
	最高平均	1.0	1.8	5.4	12.9	18.7	21.2	25.2	27.2	23.2	17.4	10.7	3.9	14.1
	最小平均	-5.4	-5.5	-2.7	2.6	7.8	12.6	17.3	18.7	13.6	6.9	2.4	-2.5	5.5
鹿児島	平均気温	6.7	7.8	11.0	15.6	19.4	22.7	26.9	27.8	24.7	19.1	14.2	8.9	17.0
	最高平均	12.0	13.2	16.5	20.9	24.4	26.9	31.0	32.0	29.7	24.8	20.2	14.7	22.2
	最小平均	2.0	2.9	5.8	10.7	15.1	19.2	23.6	23.2	20.8	14.1	9.0	4.0	12.5

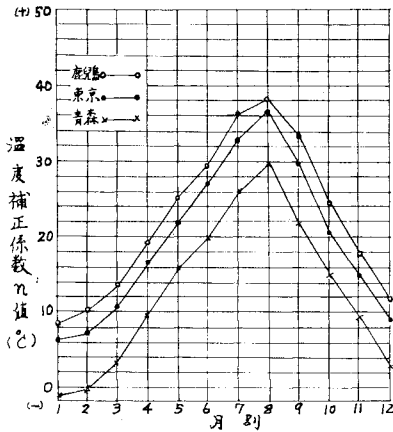


図-23 温度補正係数 n 値 (月別)

を選択し、 n 値を示した表-6の気温表(1941~1971)の30年間における平均気温を用い式(1)あるいは図-4によって表面温度の最大値 θ_{max} 、最小値 θ_{min} を求め、式(14)より n 値を求めると図-23が得られる。このようにして得られた n 値を式(13)に代入することにより当該地域の月別の温度変動と層内温度が得られる(表-7,8 参照)。

(4) 他地域への補正理論式の適用

求めた補正理論式が他の地域におけるアスファルト層の温度を求める式として適用できるや否や確かめる必要がある。

さきに、太田ら¹⁰⁾の求めている北海道幕別における実測値を利用して載くこととした。この地域はわが国では温度変化の最も激しい地域に属するので補正理論式の適否を確かめるのに好適であると考えられる。このデータは昭和41年8月28日(24時間)に2時間間隔に測定されたものである。また、舗装構造は図-24に示されているものであり、埋設温度計の感温部は深さ6cmおよび10cmの位置にある。

さきに求めている図-4あるいは式(1)によって当日の気温の最大値、最小値に対応する表面温度を求めると、これらにより $\theta_{0,max}$ が得られる。さらに式(14)

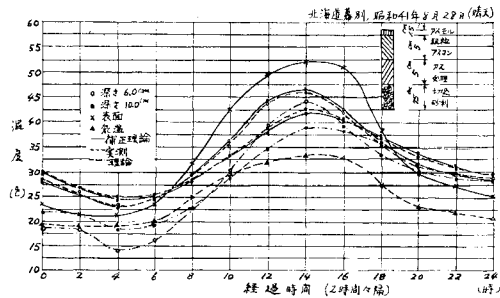


図-24 理論値、補正理論値と実測値の温度変動曲線

によって n 値が得られるから式(13)によって深さ6cm(アスファルトコンクリート層)および10cm(アスファルト処理層)における温度ならびに温度変動が得られる。すなわち図-24にみられるようになりかなり実測値と一致した値(この場合どの時刻をとっても $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲内)が得られることが実証されたことになる。

ここに本補正理論式の適用によれば、気温あるいは表面温度を知ることによって当該地域のアスファルト層の温度変動や層内温度をかなり正確に求め得ることが証明されたことになり、さきに求めた平衡点温度を計算によっても求め得ることになる。

5. ま と め

アスファルト舗装の温度についてその重要性が次第に認識されてきている。第3回国際道路舗装会議においてアスファルト舗装の構造設計に温度を適用条件として述べられており、また、著者も“アスファルト舗装体の温度と弾性係数”について²¹⁾述べているように、適用温度条件は舗装構造の設計に著しい影響をおよぼすので詳細かつ的確に定めておく必要がある。そのため、気温、表面温度、層内温度などの一連の関係について明らかにし、その結果からアスファルト層を代表する層内温度として平衡点温度を示し、また、表面温度に対応する層内温度変動や層内温度を求める補正理論式を導いた。

表-7 温度補正係数 n 値 (月別)

(東京)

項目 月別	θ_{max}	θ_{min}	$\frac{\theta_{max}-\theta_{min}}{}$	$\theta_{\theta_{max}/2}$	$\frac{\theta_{max}-\theta_{\theta_{max}/2}}{}$	$\frac{n}{5}$ ($x=0$)	$\frac{n}{10}$ ($x=5$)	$\frac{n}{15}$ ($x=10$)	$\frac{n}{20}$ ($x=15$)	$\frac{n}{25}$ ($x=20$)	$\frac{n}{30}$ ($x=25$)
1	11.6	1.4	10.2	5.1	6.50	6.50	3.25	2.17	1.63	1.30	1.08
2	12.2	1.8	10.4	5.2	7.00	7.00	3.50	2.33	1.75	1.40	1.17
3	15.5	5.0	10.5	5.25	10.25	10.25	5.13	3.42	2.56	2.05	1.71
4	21.5	11.3	10.2	5.1	16.40	16.40	8.20	5.47	4.10	3.28	2.73
5	27.3	16.4	10.9	5.45	21.85	21.85	10.93	7.28	5.46	4.37	3.64
6	32.3	20.7	11.6	5.8	26.50	26.50	13.25	8.83	6.63	5.30	4.42
7	41.0	26.3	14.7	7.85	33.15	33.15	16.58	11.05	8.29	6.63	5.53
8	45.2	28.8	16.4	8.2	37.00	37.00	18.50	12.33	9.25	7.40	6.17
9	36.5	23.2	13.3	6.65	29.85	29.85	14.93	9.95	7.44	5.97	4.98
10	25.2	15.5	9.7	4.85	20.35	20.35	10.28	6.78	5.08	4.07	3.39
11	19.6	10.0	9.6	4.8	14.80	14.80	7.40	4.93	3.70	2.96	2.47
12	14.5	4.2	10.3	5.15	9.35	9.35	4.68	3.12	2.34	1.87	1.56

n : 補正係数 ($^{\circ}\text{C}$), x : 深さ (cm)

表-8 温度補正係数 n 値 (月別)

(青森)

(鹿児島)

項目 月別	θ_{max}	θ_{min}	$\frac{\theta_{max}-\theta_{min}}{}$	$\theta_{\theta_{max}/2}$	$\frac{\theta_{max}-\theta_{\theta_{max}/2}}{}$	$\frac{n}{5}$ ($x=0$)	θ_{max}	θ_{min}	$\frac{\theta_{max}-\theta_{min}}{}$	$\theta_{\theta_{max}/2}$	$\frac{\theta_{max}-\theta_{\theta_{max}/2}}{}$	$\frac{n}{5}$ ($x=0$)
1	2.6	-4.0	6.6	3.30	-0.90	-0.90	14.7	4.0	10.7	5.35	9.35	9.35
2	3.5	-4.2	7.7	3.85	-0.30	-0.30	15.6	4.8	10.8	5.40	10.20	10.20
3	7.2	-1.2	8.4	4.20	3.00	3.00	19.0	8.0	11.0	5.50	13.50	13.50
4	15.0	4.5	10.5	5.25	9.75	9.75	24.5	13.0	11.5	5.75	18.75	18.75
5	21.4	10.6	10.8	5.40	16.00	16.00	31.8	18.2	13.6	6.80	25.00	25.00
6	25.2	14.0	11.2	5.60	19.60	19.60	36.0	22.0	14.0	7.00	29.00	29.00
7	32.0	20.0	12.0	6.00	26.00	26.00	45.0	28.3	16.7	8.35	36.65	36.65
8	37.0	21.5	15.5	7.75	29.25	29.25	47.7	28.1	19.6	9.80	37.90	37.90
9	28.0	15.2	12.8	6.40	21.60	21.60	42.5	24.5	18.0	9.00	33.50	33.50
10	20.0	9.2	10.8	5.40	14.60	14.60	31.7	16.9	14.8	7.40	24.30	24.30
11	13.8	4.4	9.4	4.70	9.10	9.10	24.4	11.2	13.2	6.60	17.80	17.80
12	6.0	-1.6	7.6	3.80	2.20	2.20	15.5	5.6	9.9	4.95	10.55	10.55

n : 補正係数 ($^{\circ}\text{C}$), x : 深さ (cm)

(1) アスファルト舗装の温度現象

(a) アスファルト層の層内温度と表面温度の日変化の関係はほぼ長円形を形成し、その面積は層厚の大きいものほど小さくかつ変化の度も小さい。

(b) アスファルト層の表面温度ならびに層内温度は気温 10°C 内外のとき最も安定しており、雨天の場合も比較的安定した状態にある。

(c) 路床、路盤の温度を月別に求め、両者とも日変化のきわめて少ないことがわかった。また夏季においては路床温度は路盤温度より低く、冬季においてはその逆である。

(2) 気温、表面温度と層内温度の関係

(a) アスファルト層の表面温度と気温の関係において、雨天のときはほぼ直線関係、晴天、曇天のときは曲線関係にある。

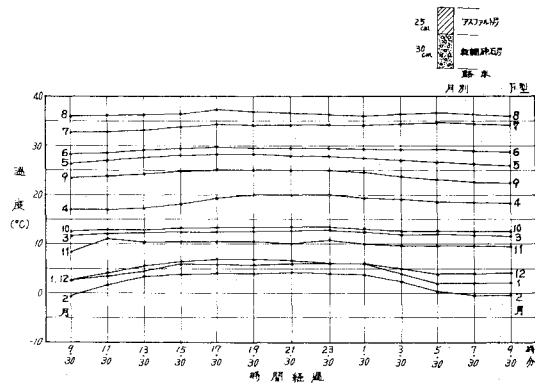
(b) アスファルト層の層内最高温度と表面温度の関係は層厚にかかわらず直線関係にある。ただし、層厚が小さいほど勾配が大きく、その割合も大きくなる。

(c) 各月のアスファルト層の底面温度を基準にして平衡点温度(単位時間当り)を求めた。これを舗装設計

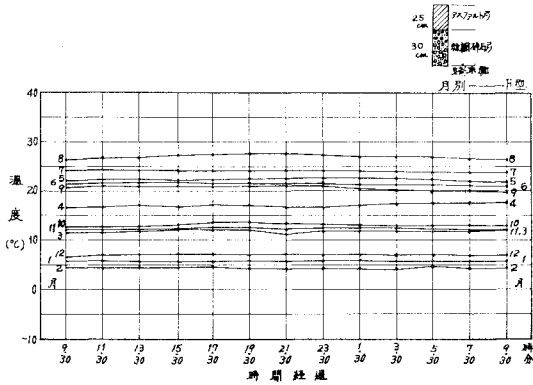
や理論解析に適用し、選択すべき層の弾性係数(変形係数)の適正化をはかるための基礎的条件とするよといと考える。

(d) アスファルト層の層内温度や温度変動を求めるための補正理論式を導いた。この式の温度変動補正係数 n 値はアスファルト層固有のものであり、月別や地域別によって異なる。

また、この式が他の地域にも適用できることを実証した。



付図-A 粒調砕石面上の温度変化(深さ 25 cm)



付図—B 路床面上の温度変化 (深さ 55 cm)

ここに、本研究を進めるにあたり、終始協力を載いた細田技師ら（東京都建設局）に深謝いたします。

参考文献

- 1) Bazin P. and J.B. Saunier : Deformability fatigue and healing properties of asphalt mixes, International road conference in Tokyo (1969).
- 2) Ph. Leger : Les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux, Bulletin de liaison des laboratoires routiers des ponts et chausées en France, n°23, Janv.-Fév, 1967.
- 3) Monismith, C.L., G.A. Secor : Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete, Proc. Assn, Asphalt paving tech, Vol, 34, 1965.
- 4) "Digging deep for temperature information", Asphalt Inst oct, 1964.
- 5) Ph. Leger : Deformability des chaussées et caractéristiques visco-elastiques des enrobés en couch de base ou de surface, Essais de plaques et mecanique des chaussées, Bulletin de liaison des laboratoires, Spécial

- B, 1965.
- 6) Barber E.S. : Calculation of maximum pavement temperatures from wether report, H.R.B. Bull 168, 1957.
- 7) Sayegh G. : Propriétés viscoélastiques des mélanges bitumineux, Amarbor, Deuxieme conferance international, 1967.
- 8) Concrete road design and construction, Road research laboratorys, D.D.I.P. (London).
- 9) Thomlinson : Temperature variations and consequent stresses produced by daily and seasonal temperature in concrete slabs, Concrete and Constructional Engineering Vol. 35 (1940), June.
- 10) 河上房義ほか：舗装表面の結氷とその防止対策，第6回，日本道路会議論文集，昭和36年。
- 11) 岩間 滋：コンクリート舗装の構造設計に関する研究，昭和38年12月。
- 12) 川下研介：熱伝導論，応用数学第21巻，昭和16年10月。
- 13) 寺澤寛一・今井 功：応用数学第4巻“複素関数論”。
- 14) 遠藤 靖：アスファルト舗装の計算(5)，道路建設，1962年10月。
- 15) 松野三朗：アスファルト舗装の温度について，土木技術資料5-5。
- 16) 太田晶昭ほか：北海道におけるアスファルト舗装体の温度について，直轄技術研究会(建設省)。
- 17) 秋山政敬ほか：アスファルト舗装の温度について，東京都土木技術研究所報告，第45号，昭和43年3月。
- 18) 秋山政敬ほか：アスファルト舗装体と温度，第23回，土木学会年次講演集，第4部。
- 19) 秋山政敬ほか：気温と道路，道路建設，1971年6月。
- 20) 気象庁統計部：気象年報，気圧，平均気温等，1971年。
- 21) 秋山政敬ほか：アスファルト舗装体の温度と弾性係数，第24回，土木学会年次講演集，第4部。
- 22) 秋山政敬ほか：たわみ性舗装の構造特性-予備調査，アスファルトコンクリートの圧縮強度と温度，東京都土木技術研究所報告46号，昭和44年3月。

(1974.10.22・受付)