

V-13 断熱工法による道路舗装の設計法

北海道開発局土木試験所 正員 ○ 田 口 史 雄

〃 久 保 宏

〃 熊 谷 茂 樹

有 田 政 博

1. ま え が き

積雪寒冷地での舗装道路の築造において凍上対策は不可欠である。一般的に置換工法が採用されてきているが、最近では良質な天然資源が枯渇化してきているため、それに代り断熱材を敷設し、路床への凍結の侵入を緩和して凍上被害を防止する断熱工法が全道各地で試験的に施工されるようになった。しかし、舗装構造の断面決定にあたっては、十分な支持力と断熱効果を得るため適当な位置に断熱材を敷設しなければならない。そこで筆者らは構内実験をふまえて昭和48年度に一般国道36号美々試験道路に4種類の断面を試験的に施工し、6ケ年の調査ならびに昭和55年には解体調査を行った。本論文ではその結果に基づき道路に断熱材を用いた場合の舗装構造の設計方法について論じた。

2. 美々試験道路の調査結果

断熱材の最適な埋設深

さを検討するため、図-1に示される舗装構造の試験道路を築造した。

ここでI-1断面は昭和48年度北海道開発局道路工事設計基準断面から調査成果を早期に得る目的でアスファルト安定処理6cm、40mm級切込砂利5cmを除いたC交通区分の構成とした。

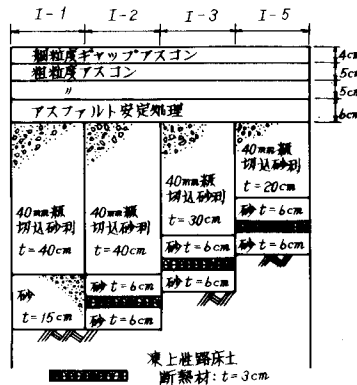


図-1 美々試験道路断面図

定期調査は昭和48～53年度まで、凍結深さ、凍上量、支持力等を中心に行った。各断面の路面凍上量と路床凍結深さを図-2に示す。凍上量は凍結指数に対して、かなりの相関がみられる。また、断熱材の埋設深さによる凍上量の違いは浅い方が幾分凍上量が小さいが大差はない。断熱材断面は標準断面(I-1)より凍上量は相当に小さくなる。路床凍結深さに関しては、埋設位置が深い程路床に侵入する凍結が小さいことがわかる。これは浅い位置に埋設すると全体の凍結深さは小さく断熱効果はみられるがその分路床の位置が上へくするため路床の凍結深さが大きくなるためでそのあたりのかね合いがある。支持力に関しては表-1のI-1, 2, 3とI-5の比較よりあまり浅過ぎると路盤、路床は弱くなるが適

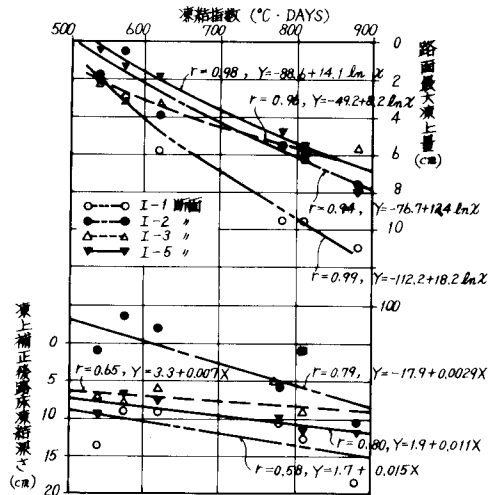


図-2 断熱工法を施した道路の凍上量と路床凍結深さ

表-1 各断面における路床・路盤の平均支持力と支持力低下率

断 面		I - 1	I - 2	I - 3	I - 5
路 床	凍結前 K_g / cm^3	5.2	5.6	7.4	5.1
	融解期 K_g / cm^3	4.2	4.5	5.5	3.0
	支持力低下率 %	19.2	19.6	25.7	41.2
路 盤	凍結前 K_g / cm^3	35.5	31.8	31.5	27.8
	融解期 K_g / cm^3	24.6	21.6	20.6	16.3
	支持力低下率 %	30.6	32.1	34.6	41.4

度な深さを保てば標準断面とほぼ同じ値を維持できることがわかる。

3. 凍結深さ及び路面たわみ量の実測値と計算値の比較

凍結深さの推定には次式で示されるAldrichの式を用いて計算する。

$$Z = \lambda \cdot \sqrt{\frac{172800 \cdot F}{(L/K)_{\text{eff}}}} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{172800}{(L/K)_{\text{eff}}}} \cdot \sqrt{F}$$

ここに

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

- X = d₁ + d₂ + … + d_n : 予想凍結深さ (cm)
- d_n : 予想凍結深さ内の各層の厚さで、d₁は最上層の厚さ (cm)
- K_n : 各層の熱伝導率 (cal/cm・sec・℃)
- L_n : 各層の融解潜熱 (cal/cm³)
- Z : 凍結深さ (cm)

- F : 凍結指数 (絶対値, °C・DAYS)
- λ = f(μ, τ) : 補正係数
- μ = $\frac{Q_{wt} \cdot F}{L_{wt} \cdot t}$, τ = $\frac{C_s \cdot t}{F}$
- Q_{wt} = (Q₁d₁ + Q₂d₂ + … + Q_nd_n) / X : 加重平均による熱容量で、Q₁は最上層のもの (cal/cm³・°C)
- L_{wt} = (L₁d₁ + L₂d₂ + … + L_nd_n) / X : 加重平均による融解潜熱で、L₁は最上層のもの (cal/cm³)
- C_s : 融解期間のプラスの平均気温 (°C)
- t : 凍結期間の日数

なお、この式において冬期間の寒さの度合を示す凍結指数及び凍結日数が重要な要素である。凍結指数を求める方法は、月平均気温、旬平均気温、日平均気温から求める3つの方法が考えられるが、月平均気温、旬平均気温によるものは、日平均気温に比べて小さくするため、凍結深さを推定するのに用いることは危険であることがわかっている。そこで今回は、日平均気温による方法で凍結深さを推定する(図-3)。日平均気温についても、1日の最高、最低気温の平均値から求める2点法、6時・10時・14時の平均から求める3点法、3時間ごとに平均する8点法、2時間ごとに平均する12点法、1時間ごとに気温を求めて平均する24点法があり、24点法が最も精度が高い。そこで美々試験道路で用いている8点法と全道の凍結指数を表すとき用いている2点法について昭和51～53年度の全道各地のデータから24点法をベースとする差の百分率を図-4、図-5に示す。その結果、8点法の凍結指数は差の百分率が-2～2%にほとんどおさまっている。また、2点法についても多少大きくする傾向にあるが、凍結深さの推定に対して、安全側にできることから実用上十分である。そこでこれらの凍結指数を用いて図-6に示す凍結指数と凍結期間の平均気温(F/t)より、融解パラメータμを求め、同図の凍結指数と熱比τの関係よりτを決定し、図-7を用いて補正係数λを決定して上記の式によって多層系の舗装構造の凍結深さを計算する。

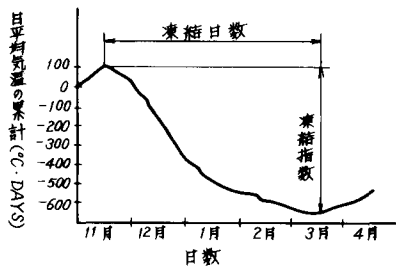


図-3 凍結指数の求め方

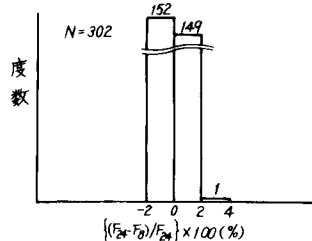


図-4 24点法と8点法の差

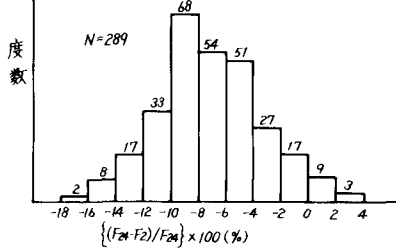


図-5 24点法と2点法の差

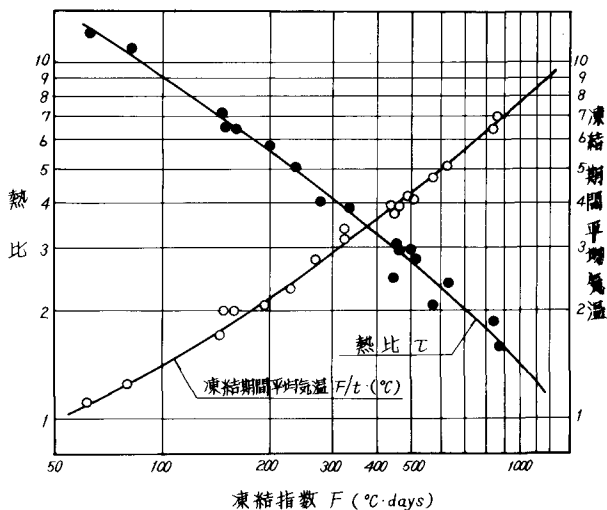


図-6 凍結指数と熱比及び凍結期間平均気温の関係(神崎による)

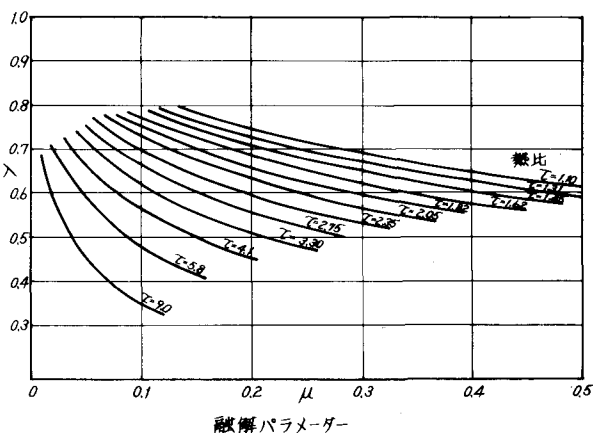


図-7 融解パラメーター、熱比と補正係数の関係 (Aldrichによる)

また、この式において用いる熱定数については、アスファルトコンクリートは伊福部の値を用い断熱材についてはカタログ値を使用し、その他の粒状材料に関しては、試験道路施工時の骨材試験から

$$Q = c \cdot rd = (0.17 + \frac{0.75}{100} w) \cdot rd$$

ここに c : 比熱 (cal/gr·°C)

rd : 乾燥密度 (gr/cm³)

$$L \div 0.8 w \cdot rd$$

w : 含水比 (%)

を用い、熱伝導率はKerstenの式

シルト・粘土質土で未凍結時の場合

$$k = (0.9 \log w - 0.2) \times 10 (0.6242rd - 3.4628)$$

ここに

砂質土 : 0.05mmより細かい粒

シルト・粘土質土で凍結時の場合

$$k = 0.01 \times 10 (1.320rd - 3.4628) + 0.025w \times 10 (0.8739rd - 3.4628)$$

子が50%未満の土

砂質土で未凍結時の場合

$$k = (0.7 \log w + 0.4) \times 10 (0.6242rd - 3.4628)$$

粘土質土 : 0.05mmより細かい

粒子が50%以上の

砂質土で凍結時の場合

$$k = 0.011 \times 10 (1.336rd - 3.4628) + 0.026w \times 10 (0.9114rd - 3.4628)$$

土

より凍結時及び未凍結時の平均値を用いた。以上の式によって求めた熱定数を表-2に示し、その値を用いてAldrichの式によって計算した凍結深さとメチレンブルーによる実測凍結深さを図-8に示す。

表-2 美々試験道路における熱定数の仮定値

材 料 名	熱 伝 導 率(K)	熱 容 量(Q)	融 解 潜 熱(L)
	(cal/cm·sec·°C)	(cal/cm ³ ·°C)	(cal/cm ³)
アスファルトコンクリート	0.00346	0.448	0
断熱材(スタイロホーム RM)	0.00008	0.011	0
切込砂利 $rd=2.1\text{gr/cm}^2$ $w=8\%$	0.00779	0.483	5.28
砂 $rd=1.75\text{gr/cm}^2$ $w=7\%$	0.00376	0.389	9.80
土 $rd=0.9\text{gr/cm}^2$ $w=7.0\%$	0.00279	0.626	50.40

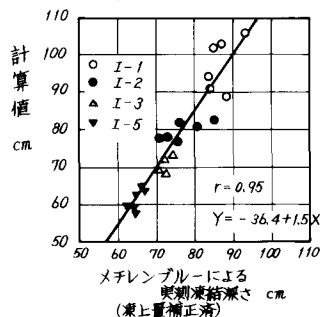


図-8 美々試験道路における凍結深さの実測値と計算値の関係

図-8より計算値が実測値に近い値となり、相関係数は0.94と非常に高い値を示しており、断熱材を用いた工法においても凍結深さの推定が可能であることがわかる。

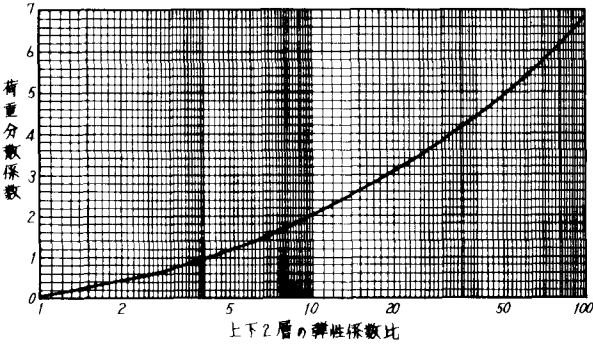
次に、路面たわみ量においては、解体調査時に舗装各層において平板載荷試験を行ったときの値を用いて、次式で示される Nascimento の方法によって材料の弾性係数を計算する。

$E_2 = 17.7 K_{30(2)}$

$d_{21} = F \cdot d_1 = \frac{E_{01}}{E_2} \cdot d_1 = \frac{17.7 K_{30(1)}}{17.7 K_{30(2)}} \cdot 30 = \frac{30 K_{30(1)}}{K_{30(2)}}$

$K_1 = \frac{d_{21} - d_1}{T_1}$

K₁ に対する E₁/E₂ を下図から読みとり E₁ の値をきめる。



上下2層の弾性係数比と荷重分散係数との関係曲線 (Nascimentoによる)

ここに

d₁ : 1層目上面の剛性載荷板直径 30 cm

d₂₁ : 2層目上面の載荷面積直径

F : 1層目と2層目の変位の比

E₁ : 1層目の弾性係数

E₂ : 2層目 //

T₁ : 1層目の厚さ

E₀₁ : 2層を1層とみなしたときの等値弾性係数

K₃₀₍₁₎ : 1層目上面での平板載荷時の地盤係数

K₃₀₍₂₎ : 2層目上面での平板載荷時の地盤係数

K₁ : 1層目の荷重分散係数

ただし、アスファルトコンクリート（以下アスコンと呼ぶ）及びアスファルト安定処理層は笠原らの論文²⁾より温度10℃、載荷時間 2×10^{-2} sec (60 km/hr) の時の値 30000 Kg/cm^2 をアスコンの弾性係数とし、安定処理層は深部で載荷時間が大きいとし 4×10^{-2} sec とし 28000 Kg/cm^2 とした。なお、断熱材においては単独での平板載荷が不可能であったため、断熱材3 cmとその上下各6 cmの砂を含んだ形（以下、この構成を断熱層と称する）での合成弾性係数である。以上の方法で求めた各層の弾性係数を表-3に示す。この値を用いて多層系の層構造としてB I S A R (Shell Oil Co.)の弾性理論プログラムを用いて計算した路面たわみ量と同一場所で解体

表-3 美々試験道路解体時の各層の弾性係数 (Kg/cm²)

材	料	弾性係数	ポアソン比
ア	ス	30000	0.35
ア	ス	28000	"
40	級	800	"
砂		670	"
断	熱	180	"
路	床	120	"
	1-2	90	"
	1-3	100	"
	1-5	90	"

時に測定したベンケルマンビームによるたわみ量との比較結果を図-9に示す。相関係数0.72と相関がみられた。従って、断熱材工法においても、弾性理論による路面たわみ量によって支持力を推定することができる

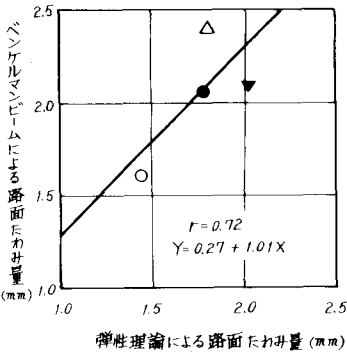


図-9 美々試験道路におけるベンケルマンビームによる路面たわみ量と計算たわみ量

4. 断熱工法による舗装構成の設計法

断熱材のように支持力の小さいものを路床上に埋設する場合、深い位置に敷設すれば路盤の支持力ならびに路床への凍結侵入を抑えることができるが、設計段階では経済性などを考慮して、どの程度が適当な埋設深さであるか把握する必要がある。そこで今回は昭和56年度北海道開発局道路工事設計基準からA交通区分で路床材料が土、凍上抑制層が砂、置換厚が100 cm（図-10）の断面を例とし、図-10の断面から50cmの砂の凍上抑制層を除き、代わりに図-11に示すような断熱層をアスファルト安定処理層の下に入れ、その埋設深さ（ h cm）を変化させて、

路面たわみ量および路床へ侵入する凍結深さを検討した。なお、計算にあたっての弾性係数は、アスコン、アスファルト安定処理は前述の値を用い、その他の材料に関しては昭和43年度から4年間、路床、路盤支持力を中心に行った美々試験道路の調査結果から前述のNascimentの方法によって求めた

値を一般道路の弾性係数とし表-4に示した。この値を用いた路面たわみ量は図-12のようになる。なお、標準断面のたわみ量は凍上抑制層を除いて求めた。これによると下層路盤の下でたわみ量がほぼ一定（1.47

mm）となっている。次に路床凍結深さについては、一般道路の熱定数の仮定値を過去10年間の道路材料試験値の平均から、断熱材については解体後の測定から求め、表-5に示した。表-5を用いて図-13を得た。図-13によると断熱層を下層路盤と路床の間にいれた場合、断熱効果があることがわかった。しかし、例えば1200℃・DAYSにおいては置換厚100 cmの標準が33 cmの路床への凍結深さを許容してい

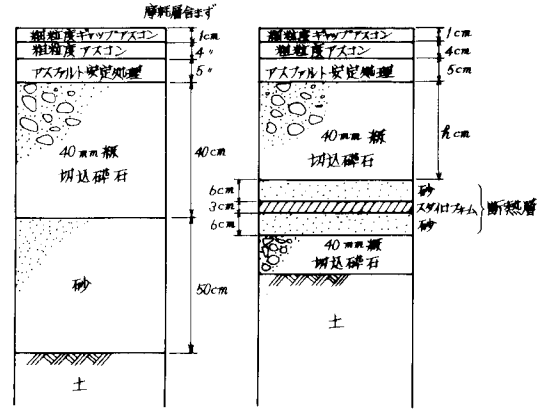


図-10 A交通区分置換厚100 cm断面例（標準断面）

図-11 A交通区分断熱工法検討断面例

表-4 一般道路の弾性係数とポアソン比の仮定値

舗装材料	弾性係数 (Kg/cm ²)	ポアソン比
アスコン表層・基層	30000	0.35
アスファルト安定処理	28000	"
40 mm級切込碎石	1820	"
80 mm級切込砂利	1750	"
砂	770	"
火山灰	540	"
断熱層	180	"
土	170	"

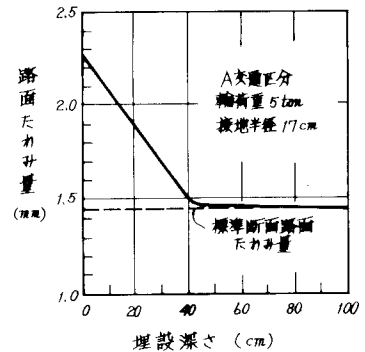


図-12 断熱層の埋設深さと路面たわみ量

表-5 一般道路に対する熱定数の仮定値

材 料 名	熱伝導率 (K)	熱容量 (Q)	融解潜熱 (L)
	(cal/cm·sec·°C)	(cal/cm ³ ·°C)	(cal/cm ³)
アスファルトコンクリート	0.00346	0.448	0
断熱材 (スタイロホーム RM)	0.00073	0.011	0
切込碎石 rd=2.0 gr/cm ³ w=5%	0.00509	0.415	8.0
切込砂利 rd=2.0 gr/cm ³ w=7%	0.00600	0.445	11.2
砂 rd=1.65 gr/cm ³ w=15%	0.00470	0.466	19.8
土 rd=1.15 gr/cm ³ w=50%	0.00343	0.627	46.0

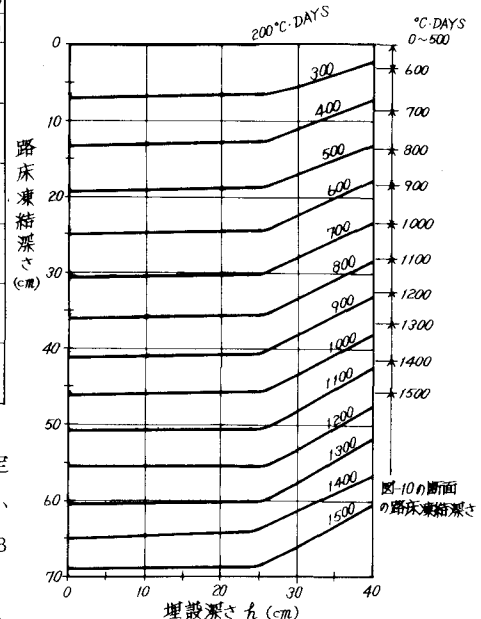


図-13 断熱層の埋設深さと路床凍結深さ

るのに対して断熱層だけの断面は48 cmと15 cm余分に凍結深さが入ることがわかる。これだけの差が路面の凍上破壊につながるかどうかは、今後の研究課題といえる。ここで、路床への凍結侵入を低減しなければならぬ場合を考えて、図-14及び図-15で示されるように断熱層の上または下へ砂を余分に増して検討してみる。そのとき、各材料についての加えた砂の厚さに対する路床凍結深さの侵入の変化は図-16に示すようになる。図-16によると図-10の標準断面に相当する路床凍結深さ(1点鎖線)にするためには、おおよそ25 cmの砂層を挿入しなければならないことがわかる。また、路面たわみは砂層を断熱材の上下どちらにふやしても基準の1.47 mmは満足するが図-17に示されるように上の砂を増加させた方がたわみの減少が大きいことがわかる。以上のことから、もし、路床の凍結深さを標準断面と同等の断熱材工法の断面を築造する場合は図-18に示される舗装構成となる。

5. 結 論

積雪寒冷地舗装における凍上対策としての断熱工法からなる美々試験道路での調査結果をもとに断熱材を用いた舗装構造設計法が明らかになったが、ここで得られた結論は次のとおりである。

- (1) 美々試験道路の調査結果から、断熱材の埋設深さと断熱効果及び支持力について、計算値と実測値の関係が明らかになった。
- (2) 路床の許容凍結深さを求める課題が残されたが計算によって最適な断熱材の埋設位置を計算できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 伊福部 宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究，土木試験所報告，1962-3
- 2) 笠原 篤，岡川 秀幸，菅原 照雄：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造力学解析への利用，土木学会論文報告集，1976-10

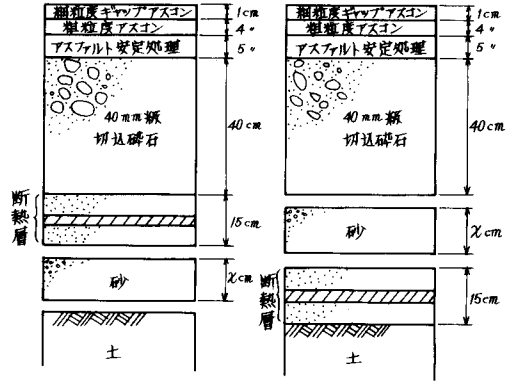


図-14 A交通区分断熱工法補強検討断面1

図-15 A交通区分断熱工法補強検討断面2

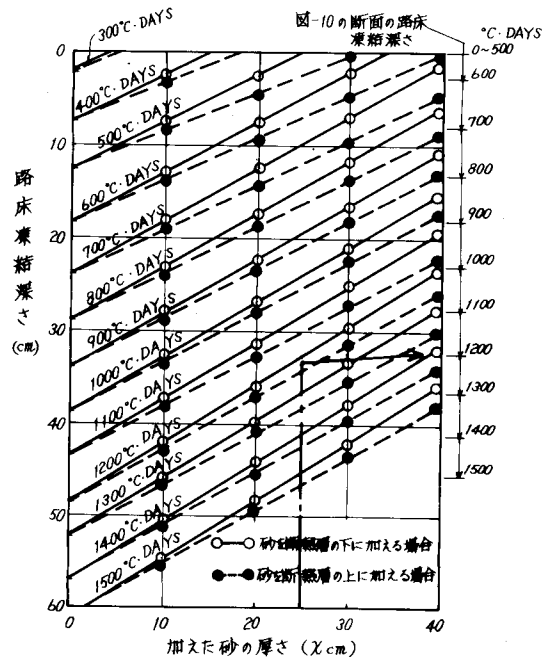


図-16 加えた砂の厚さと路床凍結深さの関係

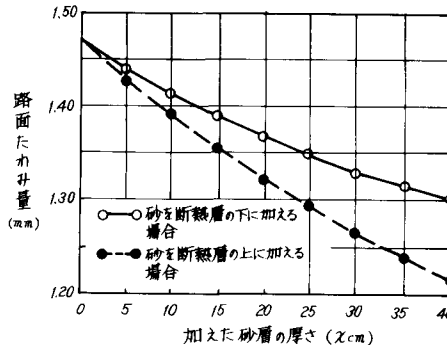


図-17 砂の増加厚さと路床凍結深さの関係

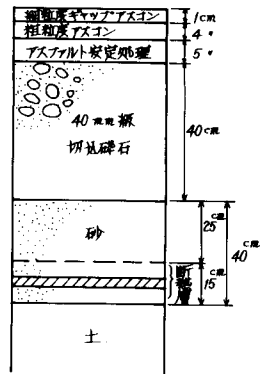


図-18 標準断面に相当する断熱工法断面