

断熱工法を用いた既設アスファルト舗装の
凍上対策に関する設計・施工マニュアル
(案)

令和7年3月

積雪寒冷地における道路舗装の
長寿命化と予防保全に関する検討委員会

1 章 総則

1.1 適用範囲

断熱工法を用いた既設アスファルト舗装の凍上対策に関する設計・施工マニュアル(案) (以下、本マニュアルという) は、既設アスファルト舗装において、凍上対策として断熱工法を用いる場合に適用する。

【解説】

本マニュアルは、凍上被害を受けた既設アスファルト舗装の凍上対策として、置換工法よりも舗装掘削深さを抑制することによりコスト縮減・工期短縮が期待される断熱工法を用いる場合の設計・施工時の留意点等について示すものである。本マニュアルでは、交通条件、気象条件、維持管理条件（除雪条件）に応じて断熱材を設置するにあたり必要な技術的事項を示した。

1.2 本マニュアルの構成

本マニュアルは、設計、施工、および経済比較の各章で構成される。

【解説】

本マニュアルは、断熱工法を用いて既設アスファルト舗装を構築する際の設計手法を示した「設計」、施工時における留意事項を示した「施工」、既設舗装の打換えに伴うライフサイクルコストの計算手法例を示した「経済比較」の各章から構成される。

2 章 設計

2.1 一般

凍上対策として断熱工法を用いる場合には、構造設計上必要となる舗装厚を確保した上で、断熱材の交通荷重に対する耐力の照査、および断熱性能の照査を行い、断熱材の材質、厚さ、設置深さなどを適切に設定する必要がある。

【解説】

アスファルト舗装は変形追従性を有し、2~3 cm 程度の凍上ではひび割れが生じないことから、舗装設計便覧においてはある程度の凍上を許容する設計期間内に想定される最大凍結深さの 70 %まで非凍上性の材料で構成する設計法（以下、置換工法）が採用されている。しかしながら、必要な置換厚が確保されていない等の理由により、凍上の被害が生じる場合がある。当該箇所において置換工法を用いて追加の凍上対策を行う場合、既設路盤・路床を掘削し、路床土を入れ換える必要が生じるが、工事費の増加、工期の増大、供用中の交通への影響が懸念される。このような条件において、断熱材を用いて凍結が入る深さを低減し、掘削深さを抑制する断熱工法が有効となる場合がある。

断熱工法の設計にあたっては、断熱材の交通荷重に対する耐力の照査、および断熱性能の照査を行う。さらに、施工時における断熱材の損傷を防ぐこと、および断熱材より上層の品質を確保する観点から舗装各層の材料や厚さを検討する。また、最終的に他の舗装種別および他の工法との経済比較を行った上、断熱工法の採否を決定する。設計手順は図-1 に示すフロー図のとおりである。

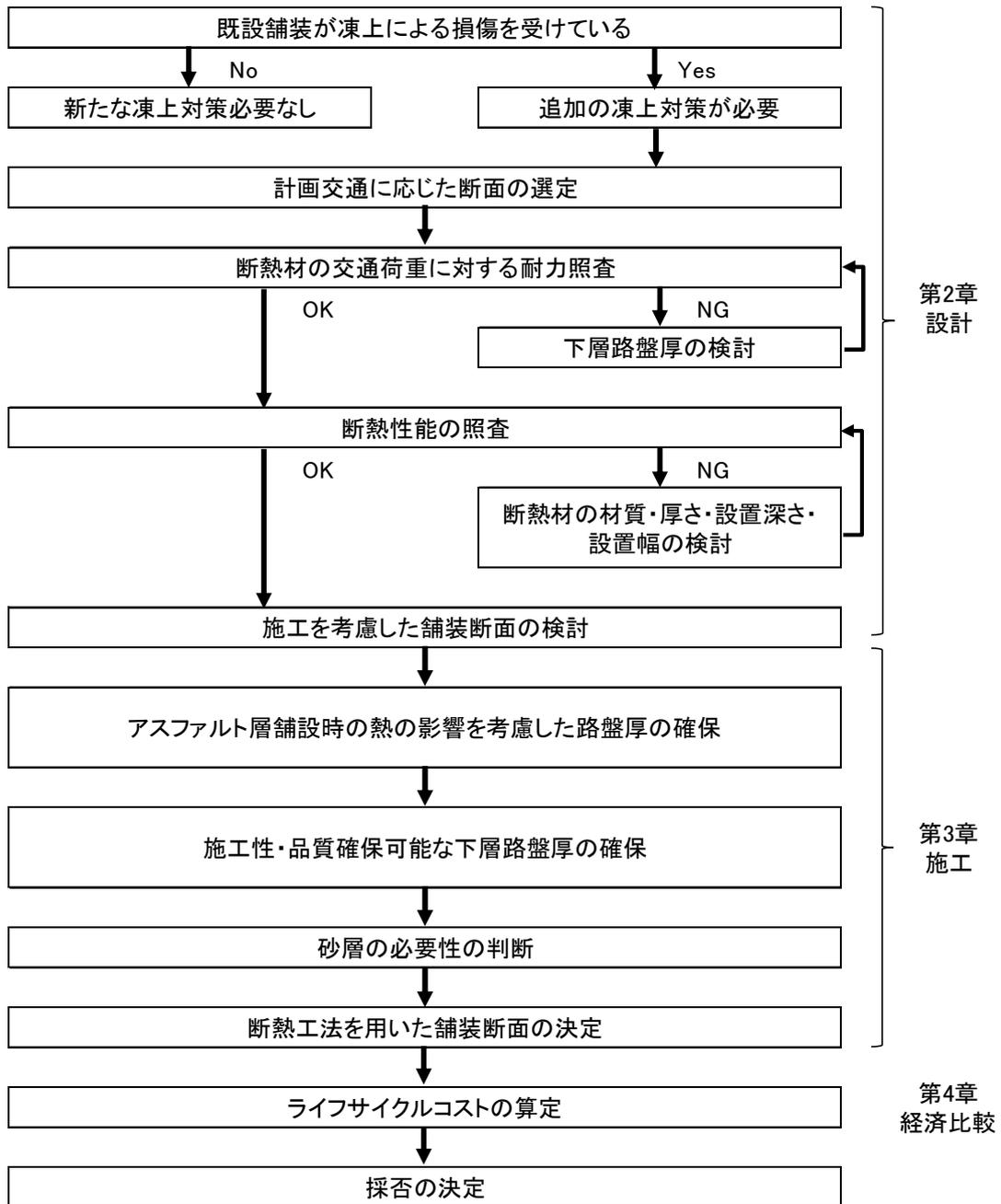


図-1 設計フロー図

2.2 交通荷重に対する照査

断熱材自体の損傷および断熱材に起因する路面の沈下、不陸等の舗装の破損を生じさせないため、断熱材の交通荷重に対する耐力照査を行う必要がある。

【解説】

路面の沈下、不陸等の舗装の破損を生じさせないため、断熱材の交通荷重に対する耐力照査¹⁾を行う。耐力照査は式(1)および式(2)により行う。

$$\sigma_z > \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2} \quad (1)$$

ここに、

σ_z : 断熱材の許容応力度 (kN/m²)

σ_{z_1} : 断熱材上面での上載物荷重 (kN/m²)

σ_{z_2} : 断熱材上面での活荷重 (kN/m²)

$$\sigma_{z_2} = \frac{P(1+i)}{(B+2h \tan \theta)(L+2h \tan \theta)} \quad (2)$$

ここに、

P : 輪荷重 (kN)

B : 車輪輪帯幅 (m)

L : 車輪接地長 (m)

h : 路面から評価面までの深さ (m)

θ : 舗装部の荷重分散角 (°)

i : 衝撃係数

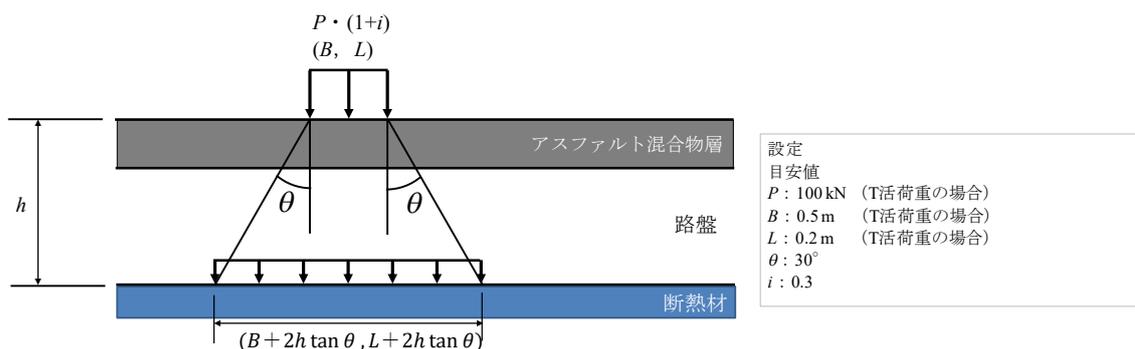


図-2 活荷重モデル図

式(1)の条件を満たすことで断熱材は十分な耐力を有すると判断される。なお、条件を満たさない場合は、断熱材の設置深さまたは、使用する断熱材を変更する。

具体的な照査の事例を付録に示したので、必要に応じて参照すること。

2.3 断熱性能の照査

断熱工法の適用にあたっては、必要な断熱性能が得られるよう断熱材の材質、厚さ、埋設深さ、設置幅を決定する必要がある。

【解説】

断熱材の材質、厚さ、および埋設深さについては、設計期間に凍上性を有する路床まで凍結が侵入することがないように修繕箇所の気象条件に応じて設定する必要がある。断熱材設置幅については車線幅を基本とするが、地先の利用条件、道路構造、維持管理方法に応じて設置幅の拡幅を検討すると良い。

断熱性能の照査にあたっては、熱伝導解析等を用いて照査する方法と、試験施工により照査する方法がある。試験施工により照査する場合は、気象条件の影響を考慮するため単年度では必要な検証が十分に行えないため複数年度にわたって調査・検証を実施するとよい。

具体的な照査の事例を付録に示したので、必要に応じて参照すること。

3章 施工

3.1 一般

凍上対策として断熱工法を用いる場合には、施工時における断熱材の損傷の防止、および断熱材上層の品質を確保する観点から断熱材の設置方法を事前に検討する必要がある。

【解説】

アスファルト混合物舗設時の断熱材への熱の影響を考慮の上、舗装断面を決定する。また、断熱材より上層の施工および品質（締固め度）への影響を考慮して、舗装断面を決定する。さらに、断熱材設置面の不陸による断熱材の損傷、および断熱材への粗粒材等の食い込みによる損傷が懸念される場合には、敷砂による砂層の設置を検討する。

3.2 アスファルト混合物舗設時の熱の影響を考慮した上層路盤厚の確保

アスファルト混合物舗設時に加熱アスファルト混合物の熱により断熱材が変質しないよう適切な深さに断熱材を設置する必要がある。

【解説】

アスファルト混合物舗設時に断熱材が変質しないよう、熱の影響を受けない適切な深さに断熱材を設置する。断熱材に応じて耐熱温度が異なるため、使用する断熱材による検証が必要である。

なお、試験施工による検証の結果、断熱材上面とアスファルト混合物層の間に 10 cm 以上の切込碎石（40 mm 級）の下層路盤層を設けることで、アスファルト混合物舗設時に断熱材の上面温度が 70℃以下となることが確認されている。

3.3 施工性・品質確保可能な上層路盤厚の確保

断熱材の上面は平滑であるため、断熱材の直上の層を施工する時に材料のすべり等が生じ、適切な締固め度が得られない懸念がある。このため、断熱材直上層の必要な層厚を確保する対策が必要である。

【解説】

断熱材の直上層に粒状材料を施工する場合、断熱材上面が平滑なため、粒状材料の層厚が薄い場合は、転圧時にすべり等が生じ、適切な仕上面あるいは締固め度が得られない懸念がある。

試験施工による検証の結果、断熱材直上層に切込砕石（40 mm 級）の粒状材料の層を設けた場合、層厚が 15 cm 以下の条件においては、**写真-1** に示すとおり転圧方向に対し垂直方向に材料のすべりに起因されると考えられる筋状の割れが転圧面に確認され、層厚が 20 cm の場合においてはこのような状況は確認されなかった。このことから、断熱材の直上に切込砕石 40 mm 級などの粒状材料の層を設ける場合においては 20 cm 程度の層厚を確保する必要がある。

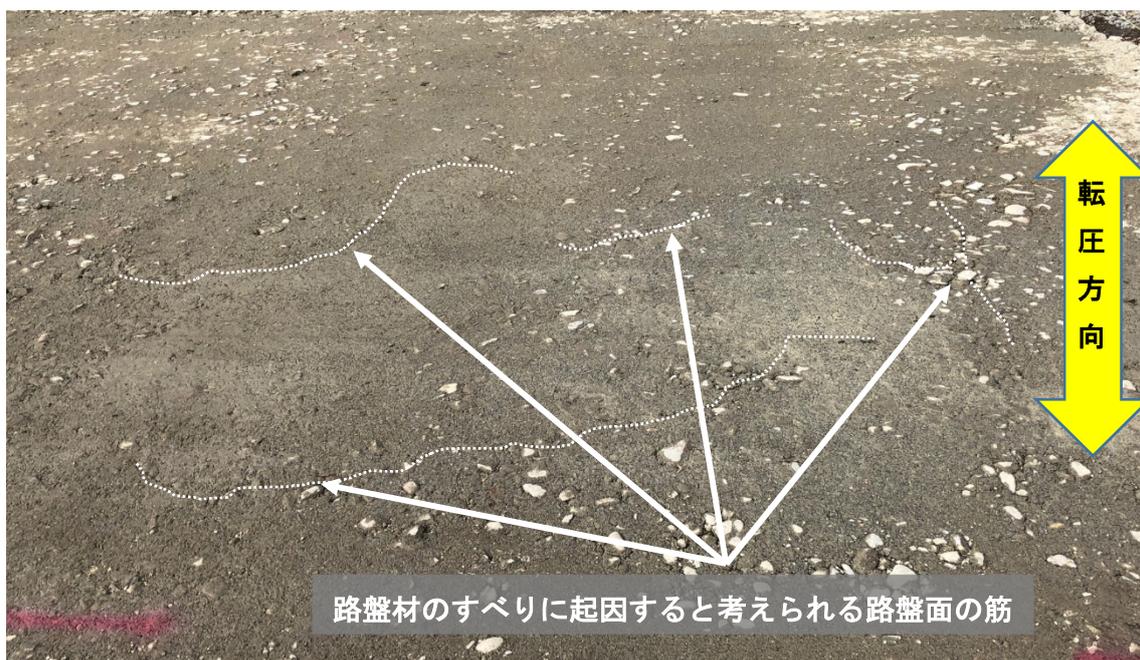


写真-1 路盤状況（路盤厚 t=15cm）

3.4 砂層の有無の判断

施工時および供用時における断熱材の損傷を防ぐため、必要に応じて断熱材の下面、上面に砂層を設ける。

【解説】

断熱材は板状であり、たわみ追従性が低いことから設置面に不陸があると、施工時および供用時の荷重により、断熱材が割れるなどの損傷の要因となる。また、断熱材に面する層の材料が断熱材に食い込み損傷の要因となる可能性がある。

断熱材下層に粒径の粗い材料を用いる場合で、不陸整正を行っても十分に平坦に仕上げることが難しい場合には、厚さ 5 cm の砂層を設ける。

また、断熱材上層に粒径の粗い材料を用いる場合において、材料の食い込みによる断熱材への貫入、もしくは損傷が懸念される場合には、断熱材上面に厚さ 5 cm の砂層を設ける。

4章 経済比較

4.1 一般

舗装種別の選定にあたっては、既設舗装の補修履歴をもとに、各舗装のライフサイクルコストを算出する。

【解説】

舗装設計にあたっては、交通条件、基盤条件、環境条件、走行性、維持管理、経済性（ライフサイクルコスト）等を考慮し、舗装種別（アスファルト舗装／コンクリート舗装等）の比較検討のうえ、舗装の種類・構成を決定し、設計するものとする（国土交通省設計業務等共通仕様書）とされている。ここでは、経済性（ライフサイクルコスト）の検討手法について解説する。

4.2 ライフサイクルコストの算出

ライフサイクルコストは、アスファルト舗装およびコンクリート舗装の各々について初期コストおよび維持管理コストを適切に計上して算出する必要がある。

【解説】

ライフサイクルコストは、アスファルト舗装およびコンクリート舗装の各々について初期コストおよび維持管理コストを適切に計上して算出する。対象個所の舗装維持修繕工事の履歴を調査し、アスファルト舗装においては、切削オーバーレイ工事等の間隔を把握の上、維持管理コストを計上する。具体的な算出例は「断熱材を活用したコンクリート舗装修繕工法の設計・施工マニュアル（案）」を参照するとよい。

付録 設計事例および断熱効果検証手法

1. 一般

凍上対策として、アスファルト舗装に断熱工法の適用を検討した場合の設計事例について概説する。

【解説】

断熱工法を用いた凍上対策について検討する場合、掘削深さが小さいほど、コスト抑制につながる。このため、各種照査項目を全て満たした上で、断熱材設置深さが最も浅くなる断面を選定する。

2. 設計事例

下層路盤厚を変更せずに断熱工法を用いて凍上対策を実施した試験施工事例を以下に示す。

【解説】

以下に、積雪寒冷地における設計・施工事例²⁾を示す。

(事例)

舗装断面	: 図-3 に示すとおり
必要置換厚	: 80 cm (20 年確率理論最大凍結深さの 70 %)
設計期間	: 20 年
交通区分	: N ₄
舗装構成	: アスファルト混合物層 12 cm、下層路盤 40 cm ³⁾
断熱材	: 押出法ポリスチレンフォーム断熱材(XPS) 2 種 bA 熱伝導率 0.034 W/(m・K)以下 圧縮強度 360 kN/m ² 以上 許容圧縮応力度 180 kN/m ² 以上 ※圧縮強度の 1/2 耐熱温度 70 °C 厚さ 50 mm、幅 1,000 mm、長さ 2,000 mm

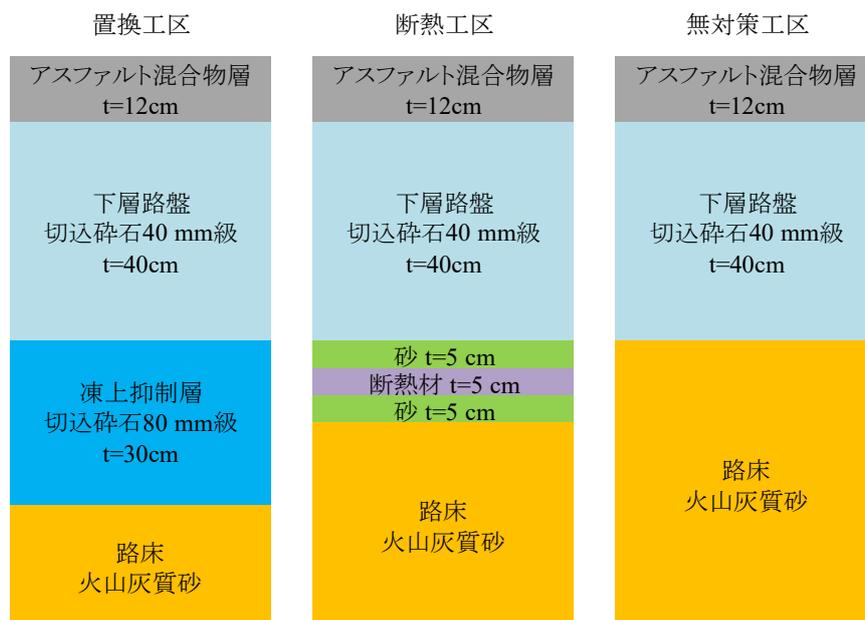


図-3 試験施工箇所の舗装構成

①アスファルト混合物舗設時の熱の影響より決まる最小上層路盤厚さ

断熱材の上面が、断熱材の耐熱温度以下となるよう下層路盤厚を決定する。予備室内試験より、断熱材の上面温度が耐熱温度以下となる条件を検証した結果、下層路盤厚の層厚が 10 cm 以上必要となる。本事例では下層路盤厚 40 cm のためこの条件を満足する。

②下層路盤の施工性・品質確保

断熱材の上に下層路盤を設けるため、下層路盤の施工性・品質（締固め度）確保の観点から、層厚を決定する必要がある。本事例では予備試験より下層路盤の層厚が 20 cm 以上必要となる。本事例では下層路盤厚 40 cm のためこの条件を満足する。

③交通荷重に対する照査

断熱材の交通荷重に対する照査を行う。耐力照査に用いる条件は表-1 に示すとおりである。これを式(2)に代入し、式(1)の条件を満たす条件を求める。本事例では、下層路盤厚 40cm の条件で式(1)の条件を満たしたことから、図-3 の断熱工区断面にて以下の検証を行う。

<照査結果>

断熱材の許容応力度 σ_z : 180 (kN/m²)

断熱材上面での上載物荷重 σ_{z_1} : $22.5 \times 0.12 + 19.6 \times 0.40 + 16.2 \times 0.05 = 11.35$ (kN/m²)

断熱材上面での活荷重 σ_{z_2} : $\frac{P(1+i)}{(B+2h \tan \theta)(L+2h \tan \theta)}$
 $= \{100 \times (1+0.3)\} / \{(0.5+2 \times 0.57 \times \tan 30^\circ) \times (0.2+2 \times 0.57 \times \tan 30^\circ)\} = 130.79$ (kN/m²)

$\sigma_{z_1} + \sigma_{z_2} = 11.35 + 130.79 = 142.14$ (kN/m²) < 180 (kN/m²)

$\sigma_z > \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2}$ となり、本条件で断熱材は十分な耐力を有する。

表-1 耐力照査

断熱材の許容応力度: σ_z		180 kN/m ²
上載物荷重: σ_{z_1}		11.35kN/m ²
計算条件	アスファルト混合物層密度	22.5 kN/m ³
	アスファルト混合物層厚	0.12 m
	下層路盤密度	19.6 kN/m ³
	下層路盤厚	0.40 m
	砂密度	16.2kN/m ³
	砂層厚	0.05 m
	交通荷重: σ_{z_2}	
計算条件	層厚: h	0.12 + 0.40 + 0.05 = 0.57 m
	荷重: P	100 kN
	接地幅: B	0.5 m
	接地長: L	0.2 m
	衝撃係数: i	0.3
	荷重分散角: θ	30°
$\sigma_{z_1} + \sigma_{z_2}$		142.14kN/m ²
判定		$\sigma_z > \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2}$ 【OK】

④砂層の必要性

断熱材施工面の不陸の解消、粒状材料の断熱材への食い込みによる破損を考慮し、本事例では断熱材の上下に砂層を設けた。

⑤断熱性能の照査

断熱性能の照査を解析で行う場合には、熱伝導解析が有効となる。市販の熱伝導解析ソフトウェア⁴⁾にて、**図-3**に示す断面をモデル化した。

照査に用いた各材料の熱定数⁵⁾は**表-2**に示すとおりであり、モデルは地表面から5mの深さまでとしている。熱伝導解析にはモデル上・下面の温度を設定する必要があり、本事例では上面にあたる路面温度を近傍 AMeDAS の外気温⁶⁾を代用し、下面温度（地中5mの深さ）の温度は、**表-3**に示す既往の温度計測事例⁷⁾より季節変動が少ないことから、設計対象箇所にもっとも近い観測点の平均温度を固定値として採用している。

置換工法においては路床への凍結の侵入および凍上を許容する設計としているが、断熱工法においては、凍上による路床面の不陸により断熱材が破損する可能性があるため路床への凍結の侵入を許容しない設計が望ましい。また、一度断熱材が深が凍結すると、断熱材の効果により地表面からの熱が伝わりにくくなり凍結層の融解が遅れ、凍上による不陸が長期間継続する恐れがある。このため、本事例では設計期間に併せ過去20年間で最も凍結指数の大きい年度（**図-4**参照）の冬期間の1時間毎の外気温データ⁶⁾を路面温度として入力し、0℃線の深さを1時間毎に求め、最も0℃線が深くまで達した時刻において評価を行った。

熱収支伝導解析の結果を**図-5**に示す。断熱材深さで0℃線が抑えられる結果が得られることを確認し、0℃線が断熱材よりも下方になった場合は、断熱材の種類、厚さ、設置深さを再検討することとなる。本事例では**図-5**の断面で0℃線が断熱材の埋設深さ以内に抑えられる結果を得た。

表-2 各材料の熱定数⁵⁾

材料名	乾燥密度	含水比	熱伝導率	熱容量	融解潜熱
	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	λ (W/m・K)	Q ×10 ⁶ (J/m ³ ・K)	L ×10 ⁶ (J/m ³)
アスファルト混合物	—	—	1.448	1.875	0.0
切込砕石	2.00	7.0	2.132	1.737	33.5
砂	1.65	15.0	1.969	1.951	82.9
断熱材 (EXP)	—	—	0.033	0.045	0.0
火山灰	1.20	26.0	1.200	1.833	1527.5

表-3 地中温度⁷⁾

	網走	旭川	札幌	帯広	釧路	根室	浦河	函館
期間最大値(℃)	9.4	11.0	10.5	10.6	9.0	9.0	10.9	12.6
期間最低値(℃)	7.6	7.8	7.0	7.1	7.0	6.6	7.5	9.1
最大値-最低値(℃)	1.8	3.2	3.5	3.5	2.0	2.4	3.4	3.5
期間平均値(℃)	8.5	9.3	8.9	8.7	8.0	7.8	9.4	10.9

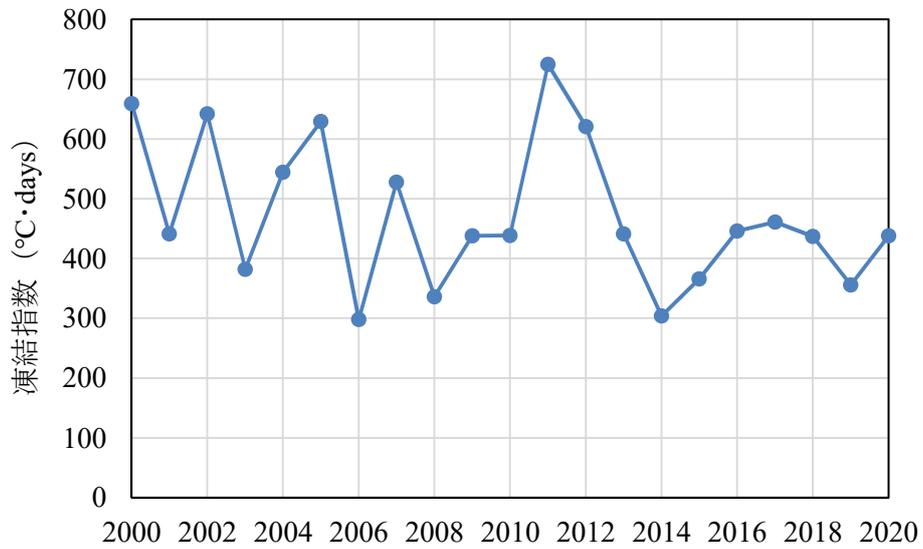


図-4 設計対象地域の 2000 年度以降の凍結指数

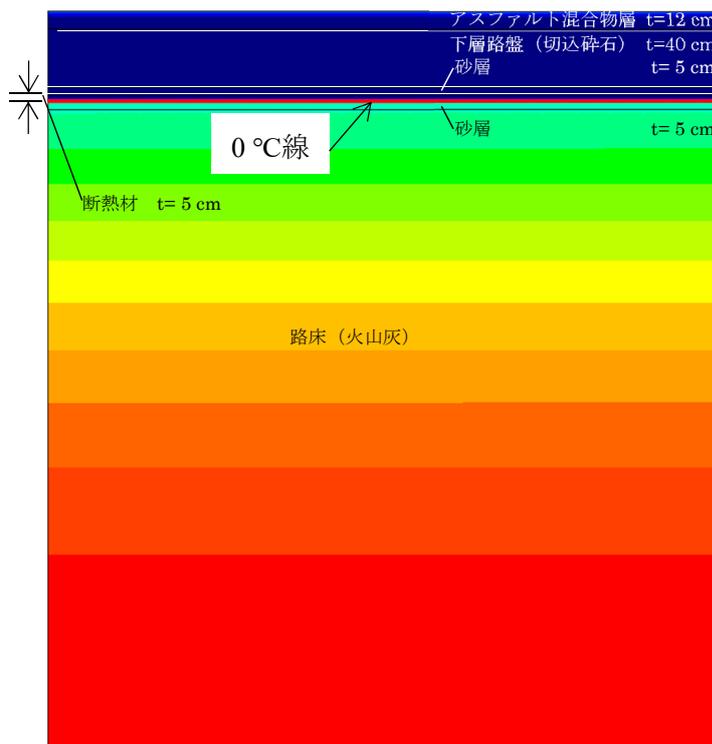


図-5 熱伝導解析結果

⑥試験施工箇所における断熱効果の検証

試験施工箇所において断熱効果の検証を行う場合は、断熱材以深への凍結の侵入の有無、凍上の発生の有無を検証する。気象条件は年度によって大きく変動することから、上記の検証は最低3年程度実施することが望ましい。

a)埋設機器を用いた凍結深さの計測方法

凍結深さの計測は、メチレンブルー凍結深度計や、凍結を電気特性で判定する手法、および舗装体温度を計測する手法がある。

熱電対温度計を用いて凍結深さを検証する場合、計測期間において断熱材の深さ以深で0℃以下の値が確認されなければ、断熱効果が十分に得られたと評価できる。

ここでは、メチレンブルー凍結深度計を用いた最大凍結深さの計測結果を図-6に示す。断熱工区の断熱材埋設深さは図-3に示すとおり57～62cmであるが、この工区の最大凍結深さはいずれの年度もこれより浅いか、断熱材埋設深さ内で収まっている。一方、無対策工区では2019年度および2022年度を除き路床面の位置する52cmより深くまで凍結が入り、路床が凍結した結果となっている。以上の結果から、断熱材設置による断熱効果が有効に働き、路床への凍結の侵入を抑制していることを確認した。

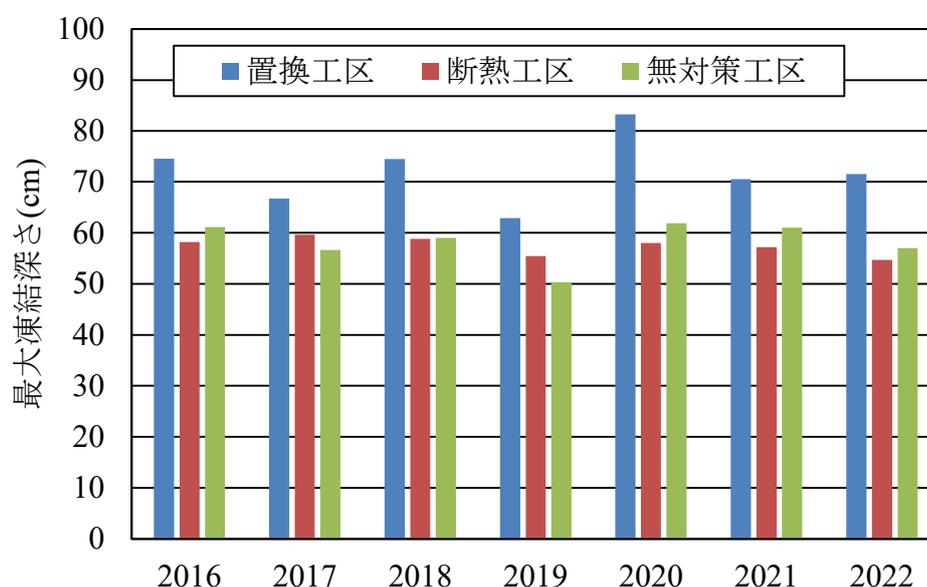


図-6 最大凍結深さ

b)凍上量計測

凍上量計測については、秋期と凍上量が最大となることが想定される時期に路面高さをレベルにて計測し、その差より計測する手法が一般的である。

凍上量測定では秋期の路面高さとして凍上量が最大となることが想定される時期に計測した路面高さの差で評価する。なお、凍上は均一に生じるとは限らないため、横断方向および縦断方向の複数の点で高さ計測を行うとよい。また、北海道地域で凍上量が最大となる時期は2月下旬～3月上旬が一般的であるため、この時期に少なくとも2回以上計測を行うとよい。

レベル測量を用いた計測結果を図-7に示す。無対策工区では、凍結が路床まで達した2016、2017および2020年度に15mm程度の凍上量が観測された。一方、置換工区および断熱工区はいずれの年度においても路床まで凍結が達していないことから、最大凍上量は数mm程度であった。また、両工区の最大凍上量の差はいずれの年度においても1mmとなっており、両工区は同程度の凍上抑制効果を発揮していることが確認された。

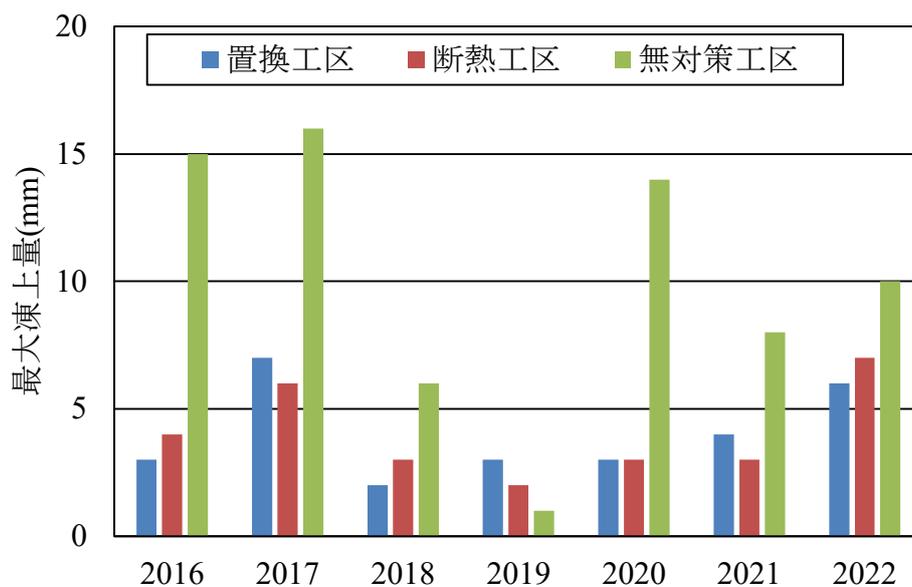


図-7 最大凍上量

⑥試験施工による支持力検証

試験施工箇所においてFWD測定車を用いて、断熱工区の支持力を計測した結果を参考に示す。FWD測定は舗装体の支持力を把握する調査手法であり、舗装面に重錘を落下させたときに生じる舗装表面のたわみを計測するものである。重錘落下位置直下のたわみ量である D_0 たわみ量を評価することで舗装体全体の支持力を把握することができる。

図-8は、各年度の融解期における D_0 たわみ量の最大値を整理したものである。無対策工区では、置換工区の D_0 たわみ量と比較して100 μm 程度大きな値となる年度が存在した。これは凍結融解作用により路床の支持力が低下したためと考えられる。一方、断熱工区の D_0 たわみ量は概ね置換工区と同程度あるいは若干大きな傾向が見られた。これは、切込砕石を用いた凍上抑制層と断熱材および砂を用いた断熱層の弾性係数の違いによるものと考えられるが、 D_0 たわみ量に顕著な差は現れなかった。

以上の結果から断熱工区は置換工区と概ね同程度の支持力が得られることが確認された。

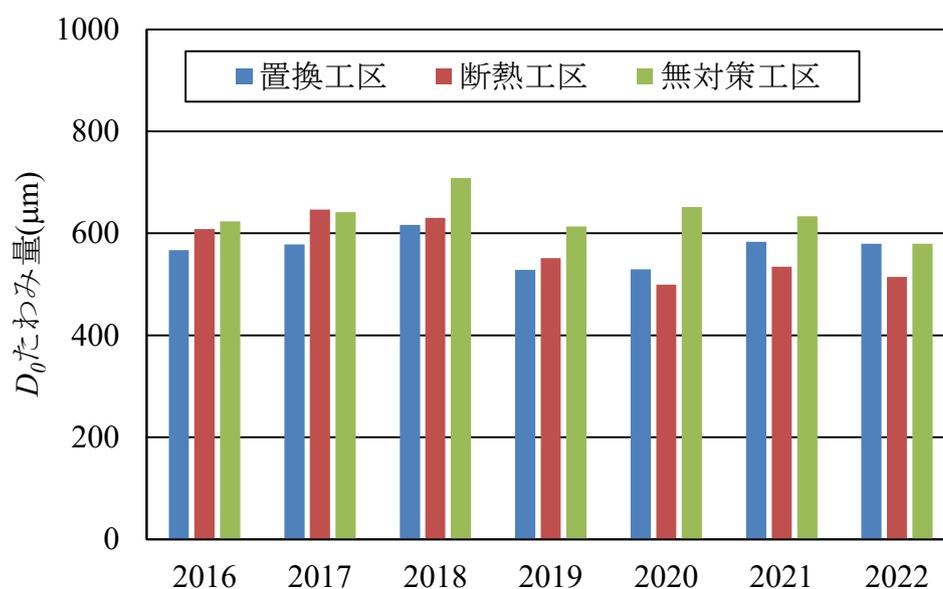


図-8 融解期における D_0 たわみ量の最大値

参考文献

- 1) 発泡スチロール土工法開発機構：EPS工法－発泡スチロール（EPS）を用いた超軽量盛り土工法－、理工図書、pp.41-42、p.83、pp.89-93
- 2) 上野千草、松本第祐、丸山記美雄、断熱工法を用いた既設アスファルト舗装の凍上対策について、寒地土木研究所月報、No.821、pp10-13、2021.8
- 3) 国土交通省北海道開発局道路設計要領
- 4) 地層科学研究所：2次元熱伝導解析ソフトウェアG-HEAT/2D
- 5) 公益社団法人地盤工学会北海道支部地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学、p. 48、2009.
- 6) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 7) 農林水産省：地中温度等に関する資料，農業気象資料，第3号，1982.