

既設アスファルト舗装からコンクリート舗装へ 修繕する際に用いられる断熱工法の設計・ 施工手法について

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○大場 啓汰
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 上野 千草
北海道開発局 建設部 道路建設課 滝沢 真吾

コンクリート舗装はアスファルト舗装よりも耐久性が高くライフサイクルコストの縮減が期待される。一方、アスファルト舗装の修繕工事においてコンクリート舗装を採用する際に凍上対策における置換率の違いなどから置換厚が不足する場合がある。本文では既設アスファルト舗装をコンクリート舗装へ打ち換える場合の追加の凍上対策として断熱工法の検討を行い、設計・施工手法についてとりまとめた結果について報告する。

キーワード：コンクリート舗装、舗装打ち換え、断熱工法

1. はじめに

道路舗装の高耐久化・長寿命化によるライフサイクルコスト（以下、LCC）の縮減が求められており、アスファルト舗装（以下、As 舗装）よりもわだち掘れやひび割れに対する耐久性が高く¹⁾長寿命化が期待できるコンクリート舗装（以下、Co 舗装）への関心が高まっている。国土交通省は平成 24 年度に、耐久性に優れるコンクリート舗装の積極的活用を施策として示しており²⁾、平成 25 年 4 月改訂の設計業務等共通仕様書では、トンネル部以外の箇所でも As 舗装と Co 舗装の LCC を比較検討するよう明記された³⁾。

ここでは、寒冷地地域における既設As舗装の打ち換え時に、断熱工法を用いたCo舗装を採用する場合の設計法および施工法について検討した結果を報告する。

さの 70 %となっており⁴⁾、既設の As 舗装を Co 舗装に打ち換える際に、置換厚が不足する場合がある。

凍上対策は一般的には上記のように置換工法が用いられるが⁵⁾、この工法を As 舗装から Co 舗装へ打ち換える際に用いた場合、凍上抑制層を増厚するため既設路盤・路床を掘り返さなければならず、インシヤルコストの増大、一般交通への影響および工期の長期化により Co 舗装採用の障害となる。

凍上を抑制するためには、凍上の三要素である土質、温度、水について、このうちの一つについて対策を行う必要があり、本研究では、温度に着目した凍上対策である断熱工法について試験施工を行い、Co舗装への適用性を検討した。

3. 検討内容

2. 凍上対策工法

Co 舗装はわずかな凍上でも、路盤面と Co 舗装版の間に隙間が生じ、これが要因となって車両走行時に Co 舗装版下面に発生する引張応力が増大し、短期間でひび割れが発生し舗装寿命が低下することが筆者らのこれまでの研究⁶⁾で明らかとなっている。このため、国土交通省北海道開発局の道路設計要領では、Co 舗装の凍上対策としての置換厚は、20 年確率理論最大凍結深さまでとされている⁷⁾。一方、As 舗装の置換厚は理論最大凍結深

Co 舗装において断熱工法を採用する際に必要な検討事項として、断熱性能の照査とともに、アスファルト中間層を設ける場合は施工時における熱の影響を検討する必要があり、この他に断熱材上部に施工する路盤材の品質確保のために必要な施工厚の検討、断熱材の交通荷重等に対する耐力照査が必要となる。なお、本研究で使用する断熱材は JIS A 9511 A 種押出法ポリスチレンフォーム保温板（2 種 bA）に適合する耐熱温度 70 °C、許容応力度 $\sigma_c=180\text{kPa}$ の材料（以下、XPS）である。

(1) 検討ケース

検討ケースを表-1に示す。いずれのケースも既設舗装の置換厚が20年確率理論最大凍結深さを下回っており、As舗装からCo舗装への打ち換えにおいて追加の凍上対策が必要となる。3つのケースのうち、岩見沢、音更はどちらもアスファルト中間層を設けるN₆交通条件であるが、冬期間の路肩の堆雪条件が異なる。苫小牧はアスファルト中間層を設けないN₅交通条件である⁵⁾。

表-1 検討ケース

ケース	岩見沢	音更	苫小牧
交通条件	N ₆	N ₆	N ₅
冬期間の路肩の堆雪	多	少	多
近傍AMeDAS	岩見沢	帯広	苫小牧
試験施工の実施	○	○	×
既設舗装の置換厚	840 mm	1,010 mm	800 mm
20年確率理論設計凍結深さ	1,300 mm	1,600 mm	1,100 mm
設計コンクリート舗装版厚	280 mm	280 mm	250 mm
設計アスファルト中間層厚	40 mm	40 mm	-

(2) アスファルト中間層施工時の熱の影響

アスファルト中間層舗設時の断熱材上面における温度を把握するため、コンテナボックスを用いて図-1に示す模擬断面を作製し、アスファルト混合物舗設時の温度計測および断熱材の外観変化を観察した。アスファルト混合物層の厚さはN₆交通断面にあわせ40 mm、断熱材上部の路盤厚は100 mmと200 mmの2断面とし、断熱材下部には不陸整正の目的で敷砂を配置した。供試体作製は室内で行い、アスファルト混合物舗設後の温度計測は、屋外（外気温 32.1℃）で実施した。

アスファルト混合物舗設時の断熱材上面温度を熱電対温度計で計測した結果、断面1で最大 57.3℃、断面2で最大 40.0℃となり、両断面とも断熱材の耐熱温度である 70℃以下となった。また、両断面とも断熱材の外観変化はないことを確認した。

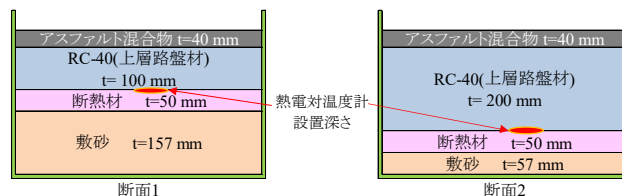


図-1 試験断面（コンテナボックス）

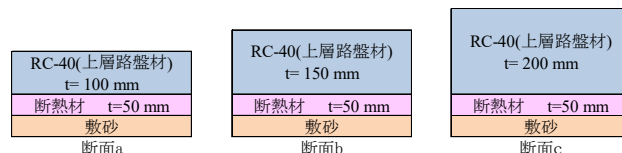


図-2 試験舗装断面（アスファルトプラント内）

(3) 路盤の施工厚

断熱材上部の路盤の適切な施工を行うために必要となる施工厚さを決定するため、アスファルトプラント内において図-2に示す3断面で試験舗装を行い、路盤材の敷均し転圧後に締固め度と外観の確認を行った。

この結果、全ての断面で規格値の 97 %以上⁹⁾を満足する値が得られたが、断面 a、b においては転圧時に路盤材料が断熱材上面で滑るような状態となり、路盤面に転圧方向に対して直角方向に筋が入る状況が見られた。一方、断面 c ではこの現象は見られなかった。

以上の結果より、層厚が 150 mm 以下では施工面に不具合が発生し、上層の施工に悪影響を及ぼす懸念があることから、層厚は 200 mm 以上が望ましいと判断した。

(4) 交通荷重に対する耐力照査

交通荷重に対する耐力照査を発泡スチロール土工法開発機構⁷⁾の手法に準拠して行った。ここで、式(1)を満たせば十分な耐力を有することとなる。

$$\sigma_z > \sigma_{z1} + \sigma_{z2} \quad (1)$$

ここに、

- σ_z : 断熱材の許容応力度 (kPa)
- σ_{z1} : 断熱材上面での上載物荷重 (kPa)
- σ_{z2} : 断熱材上面での活荷重 (kPa)

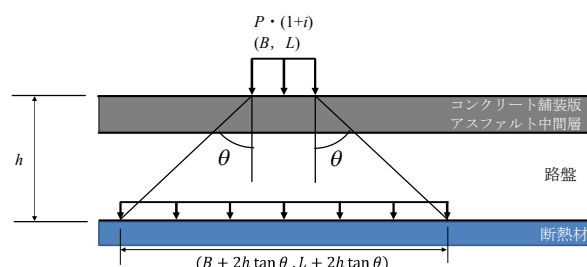


図-3 交通荷重に対する照査

断熱材上面での活荷重 σ_{z2} は、図-3に示すとおりであり式(2)で表される。

$$\sigma_{z2} = \frac{P(1+i)}{(B + 2h \tan \theta)(L + 2h \tan \theta)} \quad (2)$$

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 : 舗装部の分散角 (°)
- i : 衝撃係数

耐力照査に用いたケースおよび耐力照査結果を表-2に示す。断熱材の許容応力度はメーカー推奨値より σ_z = 180 kPaとして照査し、断熱材上部の路盤厚は200 mmに

設定した。上載物荷重 σ_{z1} と活荷重 σ_{z2} の合計は、岩見沢、音更で79.46 kPa、苫小牧で94.17 kPaとなり、いずれも式(1)の条件を満足した。

(5) 熱伝導解析による断熱性能の照査

市販の熱伝導解析ソフトウェア⁸⁾にて断熱性能の照査を行った。照査に用いた各材料の熱定数⁹⁾は表-3に示すとおりであり、モデルは地表面から5 mの深さまでとしている。熱伝導解析にはモデル上面・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AMcDASの外気温を用いた。解析には2000年度以降の22年間で最も凍結指数の大きい年度の冬期間の1時間毎の値を用いた。

下面温度は、表-4に示す既往の温度計測事例¹⁰⁾より地中5mの深さにおける地中温度の季節変動が小さいことから、期間平均温度を固定値として用いた。各ケースで使用した値は各々の近傍観測地点とし、岩見沢と苫小牧では札幌、音更では帯広とした。これらの入力条件を用いて解析を行い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間帯において照査を行った。

岩見沢における熱伝導解析結果を図-4に示す。図中赤線で示す0℃線深さは、断熱材設置深さ内に収まっている。また、音更と苫小牧においても同様の解析を実施し、0℃線深さが断熱材設置深さ内に収まる結果となった。さらに、音更は冬期間の路肩部の堆雪が少ない地域であるため、堆雪による路肩の断熱効果が期待できず、路肩側から凍結が侵入する可能性があることから、図-5に示す路肩部を追加した断面で再度解析を行った。この結果、路肩側からCo舗装版下への凍結の侵入が見られた。Co舗装版下で凍結に伴う不均一な不陸が生じるとCo舗装版の早期破損の要因となるため⁴⁾、路肩側からの凍結侵入対策として断熱材設置幅の検討を行った。図-5より回り込み幅が700 mmであるため、断熱材の拡幅幅を回り込み幅以上とし再度解析を行った。結果を図-6に示す。今回の音更の条件では拡幅幅を700mm以上とすることでCo舗装版下へ凍結が入らない結果となった。

(6) 舗装断面の決定

以上の検討結果から、断熱材の埋設深さは岩見沢と音更ではアスファルト中間層より200 mm下の路面から520 mmの位置、苫小牧ではCo舗装版下面より200 mm下の路面から450 mmの位置が妥当との結論に至った。また、路肩に冬期間堆雪がなく、堆雪による断熱効果が見込まれない場合は、凍結が路肩側からCo舗装版下へ回り込む幅を求め、この幅以上を拡幅して断熱材を設置することが妥当との結論に至った。これらの検討結果に基づき、岩見沢と音更の供用中の道路において試験施工を実施し、断熱効果と支持力の評価を実施した。

表-2 耐力照査

ケース		岩見沢、音更	苫小牧
断熱材の許容応力度: σ_{z1}		180 kPa	180 kPa
断熱材上面での上載物荷重: σ_{z1}		11.38 kPa	9.75 kPa
計算条件	コンクリート舗装版密度	23.0 kN/m ³	23.0 kN/m ³
	コンクリート舗装版厚	0.28 m	0.25 m
	アスファルト中間層密度	23.5 kN/m ³	-
	アスファルト中間層厚	0.04 m	-
	路盤密度	20.0 kN/m ³	20.0 kN/m ³
計算条件	路盤厚	0.20 m	0.20 m
	断熱材上面での活荷重: σ_{z2}	68.08 kPa	84.42 kPa
	輪荷重: P	100 kN	100 kN
	車輪輪体幅: B	0.5 m	0.5 m
	車輪接地長: L	0.2 m	0.2 m
計算条件	路面から評価面までの深さ: h	0.28 + 0.04 + 0.20 = 0.52 m	0.25 + 0.20 = 0.45 m
	舗装部の荷重分散角: θ	45°	45°
	衝撃係数: i	0.3	0.3
	$\sigma_{z1} + \sigma_{z2}$	79.46 kPa	94.17 kPa
	判定	$\sigma_z > \sigma_{z1} + \sigma_{z2}$ 【OK】	$\sigma_z > \sigma_{z1} + \sigma_{z2}$ 【OK】

表-3 材料の熱定数

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)
コンクリート	2.30	—	0.938	2.009	0.0
アスファルト混合物	2.35	—	1.448	1.875	0.0
切込碎石	2.00	7.0	2.132	1.737	33.5
砂	1.65	15.0	1.969	1.951	82.9
断熱材(XPS)	-	—	0.033	0.045	0.0
A曲線細粒度	1.20	50.0	1.574	2.738	200.9

表-4 地中5mの深さの温度

	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

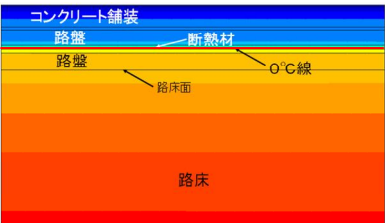


図-4 岩見沢における熱伝導解析結果

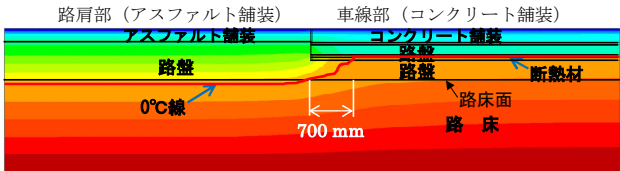


図-5 音更における熱伝導解析結果

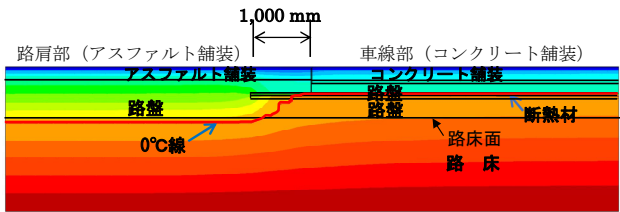


図-6 音更における熱伝導解析結果（断熱材幅拡幅）

4. 試験施工

試験施工を岩見沢においては2019年度に、音更においては2020年度に実施した。試験施工工区の断面図を図-7,8に示す。

冬期間路肩に堆雪がある岩見沢においては、図-7に示すように、「断熱材の設置幅=コンクリート舗装版幅」とした。

一方、冬期間路肩の堆雪が少ない音更においては、図-8に示すように、熱伝導解析の結果をもとに断熱材幅を700 mm以上拡張している。なお、拡張幅は施工性を考慮し、歩道側は雨水桝の前面までと設定したため拡張幅がL=1,000 mmとなっており、中央分離帯側は縁石基礎前面までと設定したため拡張幅はL=710 mmとなっている。

(1) 施工手順

片側2車線の中央分離帯を有する供用中の道路の片側車線2車線分をAs舗装からCo舗装へ打ち換えた。これに伴い、中央分離帯の一部を撤去し、施工を行う車線の交通を対向車線に振り替え、工事中は片側1車線の対面通行とした。

既設As舗装の撤去にあたっては、既設アスファルト混合物を舗装切削機で数回に分けて切削し、その後、所定の深さまで既設路盤を掘削した。

Co舗装の施工は、断熱材の接地面となる砂層を施工し平坦を保った後、断熱材を設置し、路盤層、アスファルト中間層、コンクリート舗装版を施工した。

(2) 施工状況

断熱材は写真-1に示す厚さ50 mm、幅1,000 mm、長さ2,000 mmのパネル状のXPSを用い、人力によって敷設した。また、路盤の施工にあたり3章で述べた検討結果を踏まえ、工事車両の荷重によって断熱材を損傷させないように、路盤材を事前に厚さ200 mm程度敷設した後、工事車両を乗せるよう配慮した。

断熱工法の実施に当たる施工日数は、概ね100 m×2車線の施工規模に対し、砂層敷設に1日、断熱材設置と上層路盤材の敷設に1日を要した。

(3) 路盤の品質管理

断熱材上部の路盤において、締固め度、平板载荷試験による地盤反力係数、転圧面性状を評価した。

締固め度は表-5に示す通りであり、n=3の平均値は、岩見沢で98.3 %、音更で98.5 %とともに規格値97 %以上⁹⁾を満足する値となった。

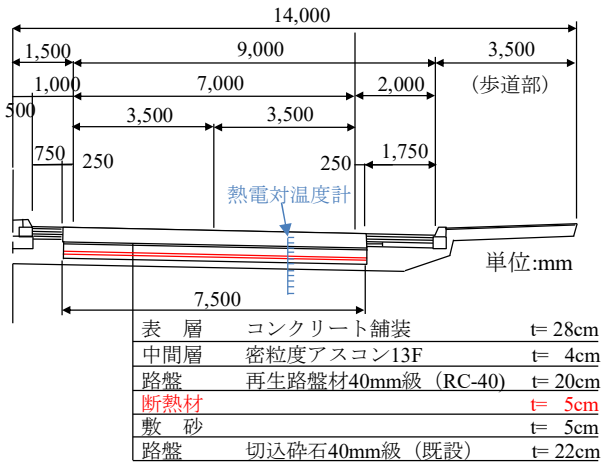


図-7 断面図 (岩見沢)

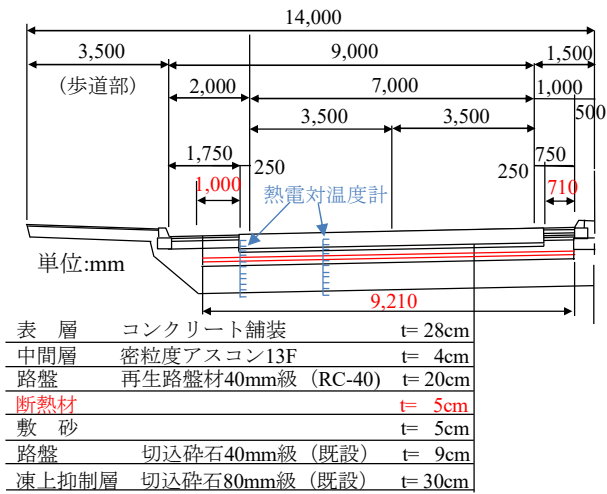


図-8 断面図 (音更)



写真-1 断熱材の設置状況

表-5 路盤の締固め度

	締固め度 (%)				
	No.1	No.2	No.3	平均	規格値
岩見沢	98.3	98.8	97.9	98.3	97以上
音更	98.9	97.8	98.8	98.5	

平板載荷試験の結果を表-6に示す。音更において $n=4$ で実施しており、地盤反力係数 K_{30} は全ての測点で規格値の 200 MN/m^3 以上¹⁾を満足する値となった。

写真-2に音更における路盤の転圧面を示す。3章で述べた試験舗装時に確認されたような路盤への筋は見られず良好な路盤面となっている。なお、岩見沢においても同様に路盤への筋は見られないことを確認している。

(4) 熱電対温度計の埋設

断熱材の断熱効果を把握するため図-7.8に青色で示す位置に舗装施工時に熱電対温度計を埋設した。

熱電対温度計の埋設位置は、岩見沢、音更ともに走行車線の版央とし、音更においては、路肩側からの凍結の回り込みを観測できるよう版央に加え、路肩側のコンクリート舗装版端部の位置に熱電対温度計を設置した。

熱電対温度計の設置深度は、コンクリート舗装版の中間・下面、アスファルト中間層、断熱材上部の路盤層、砂層および断熱材下部の路盤層以深に深度間隔 10 cm とし、断熱材上下の温度の把握、および舗装体全体の温度分布を把握できるよう配置した。

5. 現地計測

(1) 計測項目

表-7に計測項目を示す。舗装体温度については、舗装施工時に埋設した熱電対温度計をロガーに接続し、1時間間隔でデータを採取した。支持力については、FWD (Falling Weight Deflectometer：重錘落下式たわみ測定装置)を用いて通常期(10～11月)、融解期(3～5月)の年2回計測を行った。なお、載荷荷重は 98 kN とした。

(2) 舗装体温度計測結果

熱電対温度センサを用いて断熱材上下層で舗装体温度を計測した。計測深さは図-9に示す $h = -500 \text{ mm}$ および $h = -600 \text{ mm}$ である。

各年度の最低温度を表-8に示す。岩見沢、音更ともいずれの年度も版央における断熱材上側の最低温度は 0°C 以下となったが、断熱材下側は 0°C 以上を示した。また、音更の版端においても断熱材下側は 0°C 以上を示し、図-5に示されるような凍結の回り込みは確認されなかった。以上より、岩見沢、音更とも断熱材の設置により路床への凍結の侵入を防いでおり、かつ断熱材下側への凍結の侵入を防止したと判断できる結果が得られた。

(3) 支持力計測結果

路床に凍結が侵入した場合、路床土の中の水分が融解する時期(以下、融解期)に舗装体の支持力低下が生じる場合があるため、10～11月の通常期と3～5月の融解期に D_0 たわみ量を計測し、支持力低下状況を評価した。結

表-6 平板載荷試験結果

	地盤反力係数 K_{30} (MN/m^3)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	平均	規格値
音更	298	262	297	327	296	200以上

表-7 計測項目

調査項目	調査方法	調査頻度
舗装体温度	熱電対温度計による凍結深さ測定	1時間間隔
支持力	FWDによる D_0 たわみ量測定	通常期と融解期の年2回

表-8 年度別最低温度

	岩見沢 (版央)		音更 (版央)		音更 (版端)	
	断熱材上側 -500 mm	断熱材下側 -600 mm	断熱材上側 -500 mm	断熱材下側 -600 mm	断熱材上側 -500 mm	断熱材下側 -600 mm
2019年度	-3.3°C	3.7°C	-10.5°C	1.6°C	-10.0°C	0.6°C
2020年度	-0.1°C	2.9°C	-9.9°C	1.7°C	-9.7°C	1.1°C
2021年度	-4.1°C	3.1°C	-7.3°C	1.6°C	-6.6°C	1.4°C
2022年度	-5.6°C	2.7°C	-9.7°C	0.6°C	-8.8°C	0.5°C

表-9 D_0 たわみ量

	初期値 (11月)	1冬経過 (5月)	1年経過 (11月)	2冬経過 (3月)	2年経過 (10月)	3冬経過 (3月)	3年経過 (10月)	初期値と 最終値 の差
岩見沢	$174.5\mu\text{m}$	$194.6\mu\text{m}$	-	$189.2\mu\text{m}$	$176.0\mu\text{m}$	$163.8\mu\text{m}$	$164.4\mu\text{m}$	$-10.1\mu\text{m}$
音更	$224.4\mu\text{m}$	$230.6\mu\text{m}$	$269.8\mu\text{m}$	-	$202.6\mu\text{m}$	-	-	$-21.8\mu\text{m}$



写真-2 転圧後の路盤面の状況

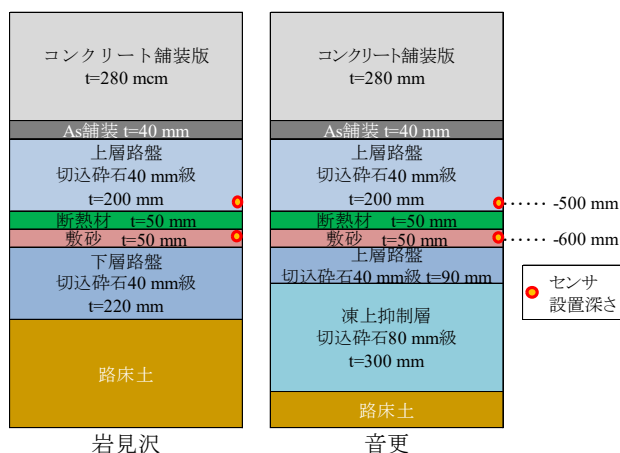


図-9 試験施工断面

果を表-9に示す。なお、載荷荷重は98 kNであり、単位は μm である。

岩見沢では3年、音更では2年経過した時点においても通常期と融解期の D_0 たわみ量に顕著な差は見られないことから、路床の凍結融解に伴う支持力低下は生じていないと判断される。

6. 設計手法の提案

上記の照査および検討を踏まえた設計手順を図-10に示す。なお、フロー図下段にあるとおり、最終的には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必要がある。

7. まとめ

本検討では、断熱材に対するアスファルト中間層舗設時の影響評価、施工を考慮した路盤の施工厚の検討、断熱材の耐力照査、および熱伝導解析による断熱効果の照査より舗装断面を決定し、これに基づき試験施工を行い、舗装体温度計測およびFWDを用いた支持力調査を実施した。この結果、施工上の問題が無いこと、断熱工法を用いることで断熱材より深くに凍結が侵入していないこと、融解期において舗装体の支持力低下が生じていないことを明らかにした。

以上より、既設アスファルト舗装をコンクリート舗装へ打ち換える場合の凍上対策として、XPSによる断熱工法が利用可能であり、設計に当たって本検討で用いた照査手法が適用可能と考える。

8. おわりに

本検討は、国土交通省北海道開発局主催の「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」の活動の一環として実施されたものである。本成果は「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)」¹²⁾としてとりまとめられ、設計手法は北海道開発局道路設計要領に反映されており、令和5年度より既設アスファルト舗装のコンクリート舗装への修繕工事で活用されている。

参考文献

- 1) 上野千草、安倍隆二、木村孝司：北海道における既設コンクリート舗装の現状について、寒地土木研究所月報 No.776、pp.12-18、2017。
- 2) 国土交通省：国土交通省技術基本計画、p.16、2012。

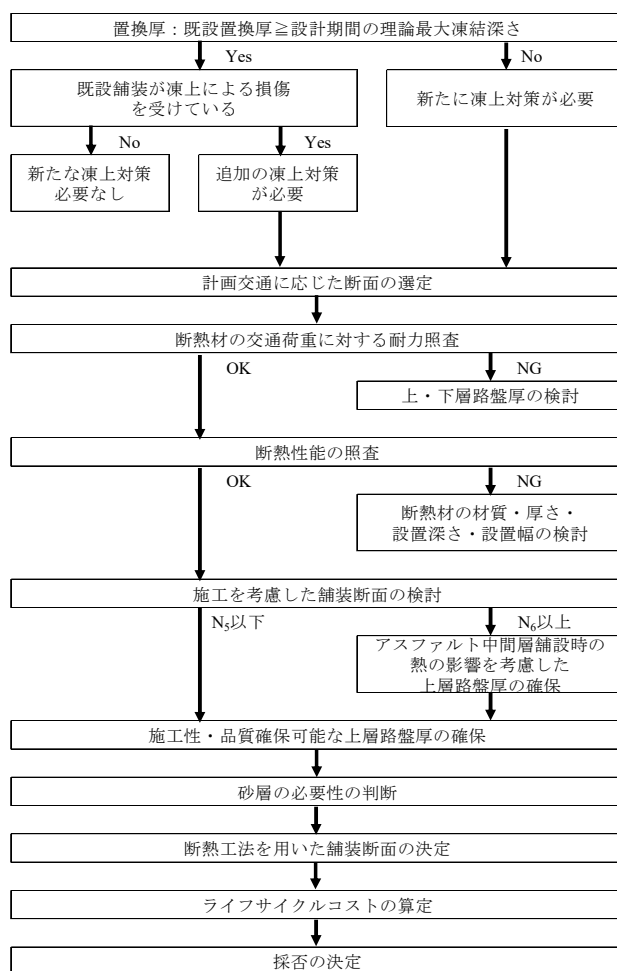


図-10 断熱材を活用したCo舗装修繕工法の設計フロー図

- 3) 国土交通省：設計業務等共通仕様書 第6編道路編、pp.32-33、2014。
- 4) 上野千草、安倍隆二、井谷雅司、木村孝司：積雪寒冷地におけるコンクリート舗装の設計法に関する一検討、土木学会論文集 E1（舗装工学）、Vol.72、No.3、pp.95-103、2016。
- 5) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領、第1集道路、p.1-5-3、p.1-5-65～67、2023。
- 6) 国土交通省北海道開発局：道路・河川工事仕様書、p.2-199、2023。
- 7) 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、pp.83、pp.89-93、1993。
- 8) 地層科学研究所：2次元熱伝導解析ソフトウェア G-HEAT/2D
- 9) 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、中西出版、p.48、2009。
- 10) 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。
- 11) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧、p.151、2006。
- 12) 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：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)、<https://www2.ceri.go.jp/jpn/iji/index.htm>、2022