

# 理論的設計方法を用いたアスファルト舗装設計に関する一検討

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 安倍 隆二  
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 上野 千草  
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 木村 孝司

「舗装の構造に関する技術基準」によりアスファルト舗装の設計方法は、従来の仕様規定から性能規定化に向けて転換することになり、設計の自由度が高まっている。本研究では積雪寒冷地においてアスファルト舗装の理論的設計方法を適用するために調査した舗装体温度の推定法や融解期における支持力の低下期間に関する環境条件に着目した検討を行った。その結果、舗装体温度の推定式を用いて算出した値と実測温度を比較した結果、積雪寒冷地の条件下でも比較的良い精度で推定できることが分かった。また、融解期に支持力が低下する期間等を把握することができた。

キーワード：積雪寒冷地、アスファルト舗装、設計方法、舗装体温度、支持力

## 1. はじめに

これまで北海道開発局で用いられてきたアスファルト舗装の設計方法は、経験的設計方法である。この設計方法はアメリカのAASHO道路試験結果を基にCBR-TA法が作られ、日本では1967年に「アスファルト舗装要綱」<sup>1)</sup>に採用されており、現在でもこの設計方法が使用されている。この設計方法を用いることで広く舗装技術を普及することができ、大きな役割を担ってきた。

平成13年に「舗装の構造に関する技術基準」<sup>2)</sup>が道路管理者に通知され、従来の仕様規定から性能規定化に向けて転換することになり、設計の自由度が高まり、コスト削減を図れる環境下になっている。ただし、現在でも経験的設計方法が基本となっており、理論的設計方法は普及していない現状にある。

本研究では積雪寒冷地においてアスファルト舗装の理論的設計方法を適用するために、舗装体温度等の環境条件に着目し検討を行った結果を報告するものである。

## 2. 理論的設計方法の概要

理論的設計方法のモデル図を図-1<sup>3)</sup>に示す。この設計方法では、アスファルト混合物層、粒状路盤層、路床を弾性体と仮定する。設計の着目点は交通荷重の載荷時に発生するアスファルト混合物層の下面に発生する引張りひずみ、路床上面に発生する圧縮ひずみである。設計した舗装断面が、舗装の疲労破壊によりアスファルト混合物層の下面から発生するひび割れ、路床を含めた舗装各層の圧縮変形の累積により路面に現れる永久変形量を計算し舗装断面を検討するものである。

図-2に理論的設計方法のフロー図<sup>3)</sup>を示す。アスファルト舗装の設計を行うための設計条件には、舗装の性能

指標の値、基盤条件、設計期間、交通条件、信頼性、環境条件、材料条件、および経済条件がある。上記の条件を設定後、舗装断面を仮定し、多層弾性理論によりアスファルト舗装下面に発生する引張りひずみ、路床上面に発生する圧縮ひずみを計算し、得られた値を破壊規準式に代入し破壊回数を計算する。力学的安定性を満たした舗装断面が決定するまで繰り返し計算を行う。その後、経済性を評価し舗装断面を決定するものである。

積雪寒冷地では凍上、凍結融解、低温クラックの影響を受けるため、設計する箇所の置換厚さの検討、通常期、凍結期および融解期における弾性係数の検討、温度応力による低温クラックを抑制するための舗装厚さや使用材料等の寒冷地特有の設計条件を考慮し設計断面を設定する必要がある。

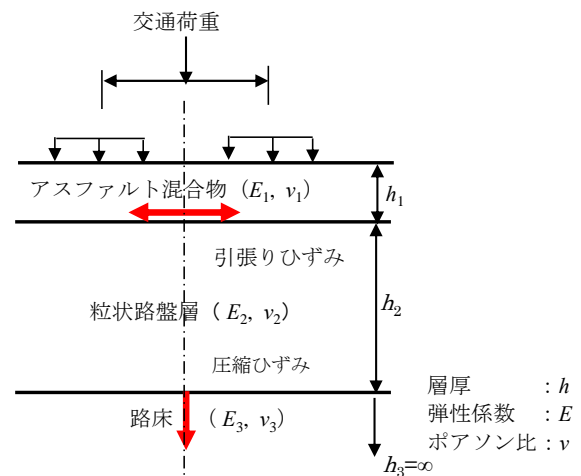


図-1 理論的設計方法のモデル図

### 3. アスファルト混合物層の温度の推定

気象条件が異なればアスファルト混合物層の弾性係数は温度の影響により異なり、多層弾性理論による引張りひずみや路床上面の圧縮ひずみも異なる値を示す。このため、理論的設計方法を行う際には、アスファルト混合物層の温度を推定する必要がある。

「舗装設計便覧」では、気温とアスファルト混合物層温度との実測データから設計に用いる温度を設定することが望ましいとしているが、空港舗装等の限られた箇所の温度計測は可能であるが、延長が長い区間の国道等では現実的には厳しいと考えられる。また、「舗装設計便覧」では、アスファルト混合物の温度測定ができない場合の気温データからアスファルト混合物層の温度を推定する式<sup>3)</sup>も提案されている。

$$M_p = M_a \left[ 1 + \frac{2.54}{z + 10.16} \right] - \frac{25.4}{9(z + 10.16)} + \frac{10}{3} \quad (1)$$

ここに、

$M_p$  : 月平均舗装温度 (°C)

$M_a$  : 月平均気温 (°C)

$Z$  : 温度を推定しようとしている点の表層上面からの深さ (cm)

本研究では、試験施工箇所計測した舗装体温度（以下、実測温度）とアメダスデータを用いて(1)式より推定した舗装体温度（以下、推定温度）を比較し、積雪寒冷下の気象条件における提案式の適用の可能性を検討した。

図-3に試験施工箇所の舗装構成を示す。温度測定箇所は、苫小牧市、稚内市、石狩市、留萌市で実施した。苫小牧市の測定箇所は寒地土木研究所所有の苫小牧寒地試験道路、稚内市は一般国道235号稚内市声間、石狩市は一般国道231号石狩市浜益、留萌市は深川・留萌自動車道の本線上で計測を実施した。試験施工箇所の舗装厚は9~27cmの範囲であり、舗装厚さ、地域差、および混合物種の違いによる推定式の精度を評価した。精度については、供用している道路の実測値の範囲である-10~20°Cに着目した。

図-4、図-5に苫小牧寒地試験道路で計測した苫小牧1工区と苫小牧3工区の実測温度と推定温度の関係を示す。なお、使用した実測温度データは月平均気温である。苫小牧寒地試験道路は、積雪量が少ないため、冬期間の路面状態はアスファルト舗装が露出している状態が多い。苫小牧1工区は舗装厚12cm、苫小牧3工区は20cmの舗装厚である。実測値と推定値の差は-10~20°Cの温度領域では1工区で-1~+2°C程度、3工区では-2~+2°C程度の精度である（表-1）。

図-6~8に稚内試験舗装箇所の実測温度と推定温度の関係を示す。1工区の舗装厚は9cm、3工区は15cm、6工区は27cmである。熱電対の埋設位置を路肩部としたため、堆雪の影響を考慮し1月~3月のデータを除いて整理

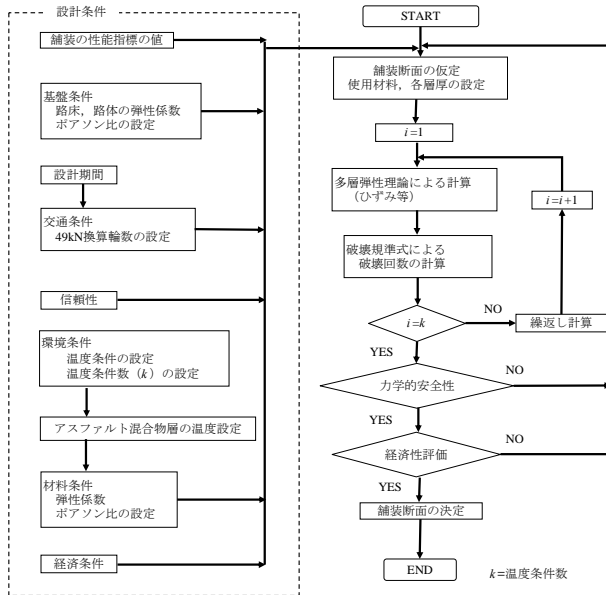


図-2 理論的設計方法のフロー図

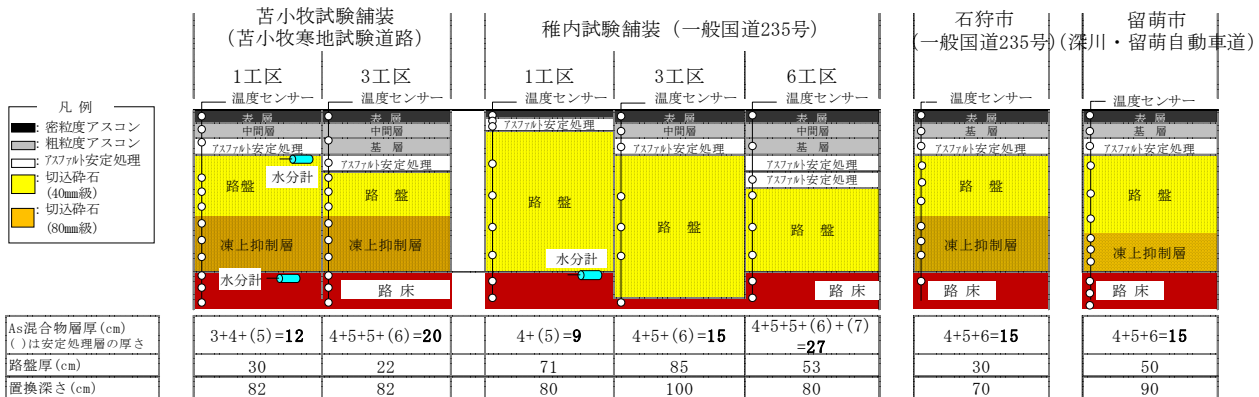


図-3 試験舗装箇所の舗装構成

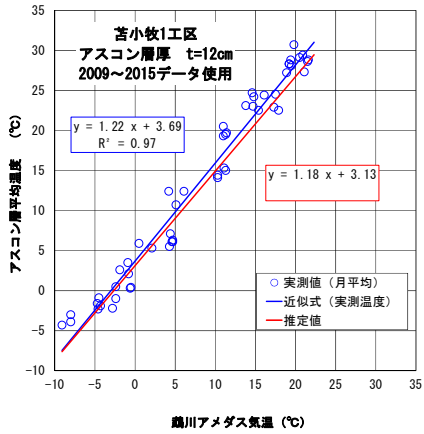


図-4 実測温度と推定温度の関係（苦小牧1工区）

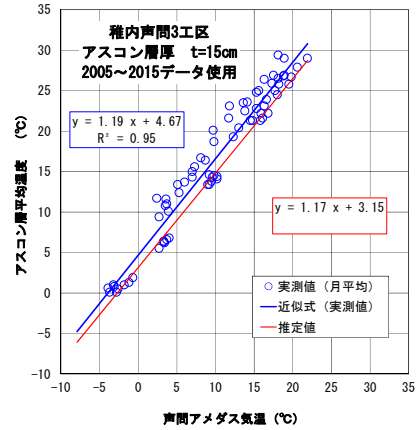


図-7 実測温度と推定温度の関係（稚内3工区）

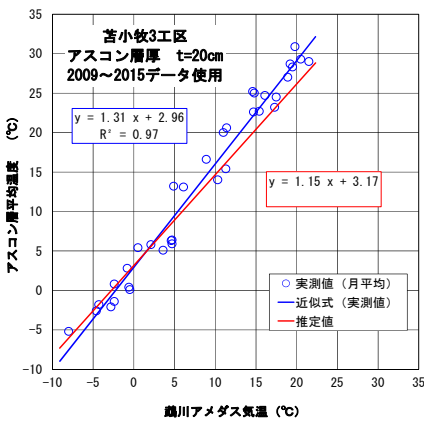


図-5 実測温度と推定温度の関係（苦小牧3工区）

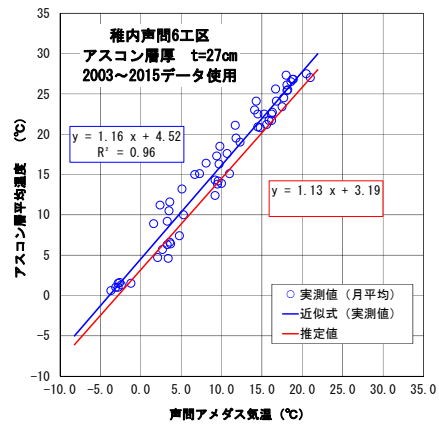


図-8 実測温度と推定温度の関係（稚内6工区）

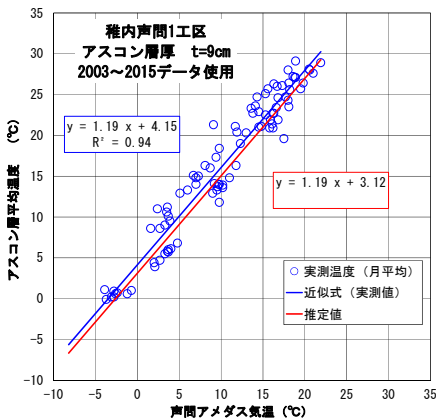


図-6 実測温度と推定温度の関係（稚内1工区）

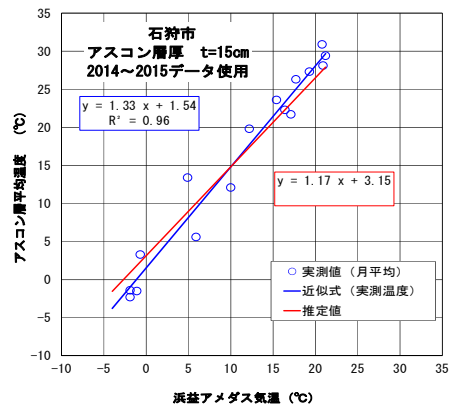


図-9 実測温度と推定温度の関係（石狩工区）

した。実測値と推定値の温度差は、1工区は0～+1℃、3、6工区で0～+2℃程度である（表-1）。

図-9に石狩工区の実測温度と推定温度の関係を示す。この箇所は冬期間、圧雪路面が多い箇所である。実測値と推定値の温度差は-10～20℃の温度領域では、-2～+2℃程度である（表-1）。

図-10に留萌工区の実測温度と推定温度の関係を示す。この工区は表層に排水性舗装を施工しており、冬期間は

圧雪路面になることもある区間である。実測値と推定値の差は-10～20℃の温度領域では、0～+1℃未満である。

表-1に全ての試験施工箇所の実測温度と推定温度の温度差を示す。温度領域、舗装厚、試験施工箇所の位置、混合物種類が異なっても、実測温度と推定温度の温度差は-2～+2℃程度であり、アメダスデータの気温データで(1)式を用いアスファルト混合物層の温度を推定しても精度良く温度を推定できることが確認された。

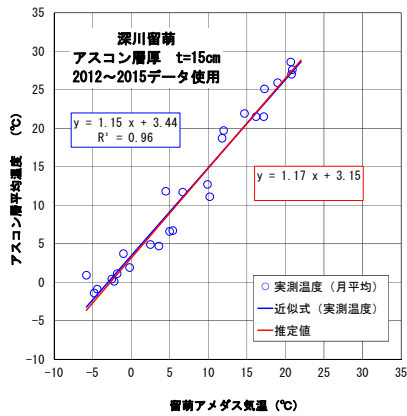


図-10 実測温度と推定温度の関係（留萌工区）

表-1 実測温度と推定温度の温度差

| 調査箇所<br>工区名 | 苫小牧寒地試験道路 |      | 稚内試験舗装 |      |      | 石狩市  | 留萌市  |      |
|-------------|-----------|------|--------|------|------|------|------|------|
|             | 1工区       | 3工区  | 1工区    | 3工区  | 6工区  |      |      |      |
| 実測温度(°C)    | 0         | 3.7  | 3.0    | 4.2  | 4.7  | 4.5  | 1.5  | 3.4  |
|             | 10        | 15.9 | 16.1   | 16.1 | 16.7 | 16.1 | 14.8 | 14.9 |
|             | 20        | 28.1 | 29.2   | 27.8 | 28.5 | 27.6 | 28.1 | 26.4 |
| 推定温度(°C)    | 0         | 3.0  | 3.1    | 4.4  | 3.2  | 3.2  | 3.2  | 3.2  |
|             | 10        | 16.1 | 14.9   | 16.3 | 14.9 | 14.5 | 14.9 | 14.9 |
|             | 20        | 29.2 | 26.7   | 28.2 | 26.6 | 25.8 | 26.6 | 26.6 |
| 温度差(°C)     | 0         | 0.7  | -0.2   | -0.3 | 1.5  | 1.3  | -1.6 | 0.3  |
|             | 10        | -0.2 | 1.1    | -0.2 | 1.8  | 1.6  | 0.0  | 0.1  |
|             | 20        | -1.1 | 2.4    | -0.4 | 1.9  | 1.8  | 1.6  | -0.1 |

#### 4. アスファルト混合物層の弾性係数の試算

試験施工箇所のアスファルト混合物層の弾性係数を試算するため、アメダスデータ（苫小牧市、石狩市、留萌市：1980～2010年の30年、稚内市：2003～2015年の13年間）を用い月別の平均温度を算出した（図-11）。各試験施工箇所の平均気温の範囲は概ね-10～+20°Cである。

アスファルト混合物の弾性係数の算出は、アスファルト安定処理混合物に対する10Hzの4点曲げ疲労試験から得られた(2)式<sup>4)</sup>を用い算出した。

$$S_{mix} = \frac{1}{\left[ \frac{1}{8500} + \left\{ 9.373 \times 10^{-19} \times (1.118^{T_k}) \right\} \right]} \quad (2)$$

ここに、

$S_{mix}$ ：アスファルト混合物の弾性係数(MPa)

$T_k$ ：混合物温度(K)

図-12 に試験施工箇所における推定したアスファルト混合物層の温度を示す。4箇所の試験施工箇所推定した温度の範囲は-5～+30°C程度である。この数値を用い算出した弾性係数を図-13 に示す。弾性係数の範囲は2000～8000MPa程度であり、夏期と冬期の弾性係数の差は6000MPa程度となり、季節の変動により、弾性係数が大きく変動することが分かる。

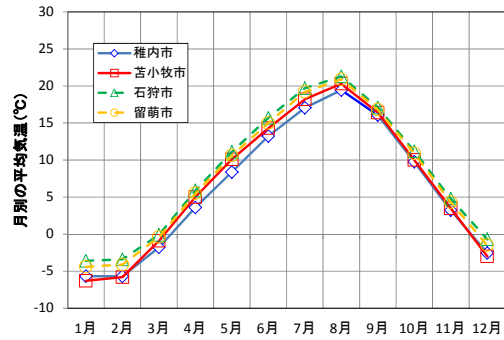


図-11 試験施工箇所の月別の平均気温

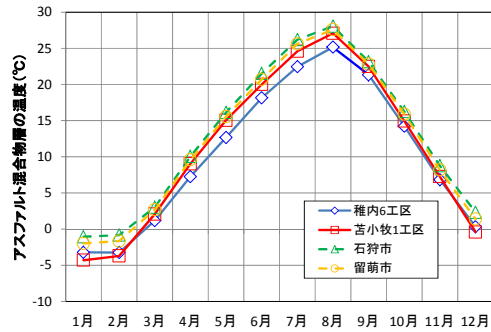


図-12 推定したアスファルト混合物層の温度

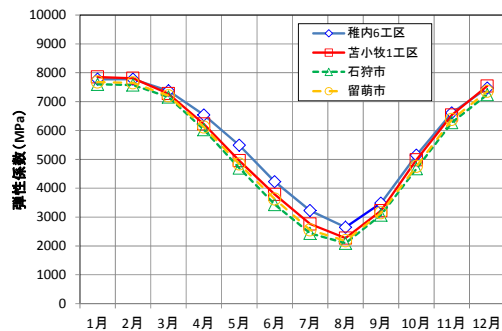


図-13 アスファルト混合物の弾性係数

#### 5. 融解期の支持力低下の期間

アスファルト舗装の設計を経験的設計方法で行う場合、路床の設計CBRは1年間の中で最も厳しい気象条件を想定した融解期の支持力で設計が行われる。北海道開発局の設計方法<sup>9)</sup>では、凍結融解後のCBR試験を行い、設計CBRを設定する。

一方、理論的設計方法では、月毎の弾性係数を算出するため、融解期の期間を設定し、設計することが可能となりコスト削減が可能な舗装断面を検討することができる。

図-14に苫小牧1工区の下層路盤と路床の含水比を示す。2011年を図示したのは、この年にFWD試験を実施しており、含水比と支持力の関係を把握できるからである。路床と下層路盤に水分計を埋設しているが、この機器は誘電率により計測するため、凍結時は水の誘電率を測定

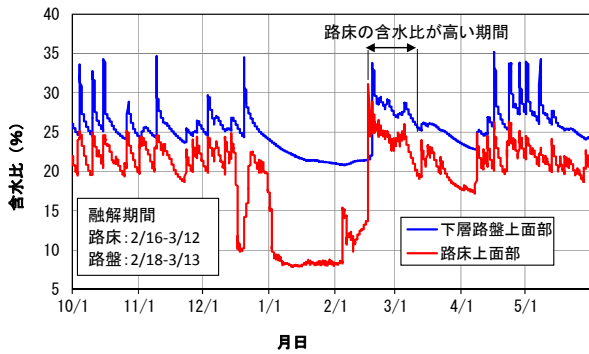


図-14 下層路盤と路床の含水比（苦小牧1工区）

表-2 路床の含水比が高い期間（苦小牧1工区）

| 年度   | 含水比期間 |       | 含水比が高い日数 | 含水比が高い月数 |
|------|-------|-------|----------|----------|
|      | 開始    | 終了    |          |          |
| 2010 | 2月25日 | 3月13日 | 16       | 0.5      |
| 2011 | 2月16日 | 3月12日 | 24       | 0.8      |
| 2012 | 3月1日  | 3月24日 | 23       | 0.8      |
| 2013 | 2月27日 | 3月4日  | 34       | 1.1      |
| 2014 | 2月26日 | 4月4日  | 36       | 1.2      |
| 2015 | 2月17日 | 4月3日  | 45       | 1.5      |

表-3 路盤の含水比が高い期間（苦小牧1工区）

| 年度   | 含水比期間 |       | 含水比が高い日数 | 含水比が高い月数 |
|------|-------|-------|----------|----------|
|      | 開始    | 終了    |          |          |
| 2010 | 2月23日 | 3月13日 | 18       | 0.6      |
| 2011 | 2月18日 | 3月13日 | 23       | 0.8      |
| 2012 | 2月28日 | 3月24日 | 25       | 0.8      |
| 2013 | 2月28日 | 4月3日  | 35       | 1.2      |
| 2014 | 2月24日 | 4月4日  | 39       | 1.3      |
| 2015 | 2月17日 | 4月3日  | 45       | 1.5      |

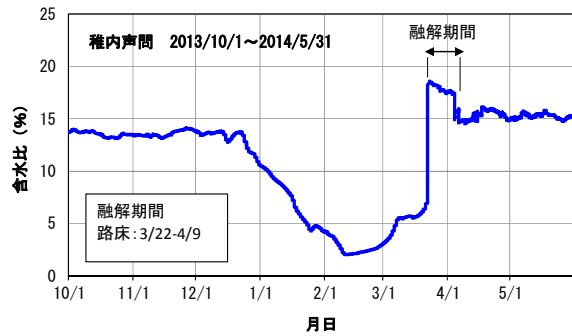


図-15 路床の含水比（稚内1工区）

表-4 路床の含水比が高い期間（稚内1工区）

| 年度   | 含水比期間 |       | 含水比が高い日数 | 含水比が高い月数 |
|------|-------|-------|----------|----------|
|      | 開始    | 終了    |          |          |
| 2008 | 3月11日 | 5月4日  | 54       | 1.8      |
| 2009 | 3月18日 | 4月21日 | 34       | 1.1      |
| 2010 | -     | -     | -        | -        |
| 2011 | 3月19日 | 4月8日  | 20       | 0.7      |
| 2012 | 3月23日 | 4月24日 | 33       | 1.1      |
| 2013 | 3月27日 | 4月24日 | 29       | 1.0      |
| 2014 | 3月22日 | 4月9日  | 18       | 0.6      |
| 2015 | -     | -     | -        | -        |

融解期間は水の誘電率を測定することになる。そのため、氷と水の誘電率が異なるため融解した時期を判断することが可能となる。本論文では融解期間の始まりを誘

電率が上昇し始めた日、終了した日は、前後の日と比較し含水比が下限になった日とした。路床上部に埋設した水分計に着目すると、路床が凍結した期間は1月上旬から2月上旬頃までであり、2月18日から融解し3月12日までの24日間は含水比の高い期間となっている。4月以降に含水比が上昇しているのは、水分計が路肩部に埋設しているため、降雨の影響を受けて含水比の変動を受けている。表-2に苦小牧1工区の路床の含水比が高い期間を示す。データは2010～2015年の値を示し、含水比が高い日数は16～45日間であり、最大2ヶ月間程度となる。

下層路盤に着目すると、2月18日から3月13日までの23日間は含水比の高い期間となる。表-3に2010～2015年までの路盤の含水比が高い期間を示す。18～45日間は含水比の高い期間となり、最大2ヶ月程度である。

以上の結果から苦小牧1工区における融解期間と判断できる区間は2月中旬から4月上旬頃で、最大2ヶ月程度となる。

図-15に稚内1工区の路床の含水比を示す。水分計の埋設位置は車道の中央部に埋設しているため、苦小牧と異なり降雨の影響を直ぐには受けない箇所である。そのため、含水比の上昇期間は苦小牧と比較し判断しやすい。

2014年の融解期に着目すると、3月22日に融解が始まり、4月9日に含水比の高い期間が終了している。表-4に2008～2015年度の稚内1工区の含水比が高い期間を示す。含水比の高い日数は18～54日であり、最大2ヶ月程度である。

以上の結果から稚内1工区における融解期間と判断できる区間は3月中旬から5月上旬頃で、最大2ヶ月程度となる。

稚内工区と苦小牧工区の融解期間は概ね同程度であるが、融解期の開始と終了時期が異なり、気象条件により地域差があることが確認された。

次に融解期の支持力を評価するため、苦小牧寒地試験道路でFWD試験を実施した。図-16に苦小牧1工区で実施したFWD試験結果を示す。調査時期は図-14に示す含水比を測定した同じ時期に測定した。D0たわみ量は載荷荷重を49KNに荷重補正<sup>9)</sup>した値と20℃に温度補正<sup>9)</sup>した値を示した。

路床が凍結している1月上旬から2月上旬の期間は、荷重補正および温度補正したD0たわみ量は100～200 $\mu$ 程度を示し、舗装体の支持力は高い。含水比の高い期間である2月16日から3月12日において、荷重補正および温度補正したD0たわみ量は含水比がピークに達した2月下旬の測定日にたわみ量が大きくなり支持力が低下している（赤い破線で囲まれた箇所）。路床の支持力の評価はD150のセンサーでも可能であるので、推定式<sup>9)</sup>を用いCBRを評価した（図-17）。CBRの推定値は、含水比の高い2月中旬から下旬にかけて支持力が低下していることが確認できる（赤い破線で囲まれた箇所）。

図-18に各センサーのたわみ量を示す。厳冬期、融解

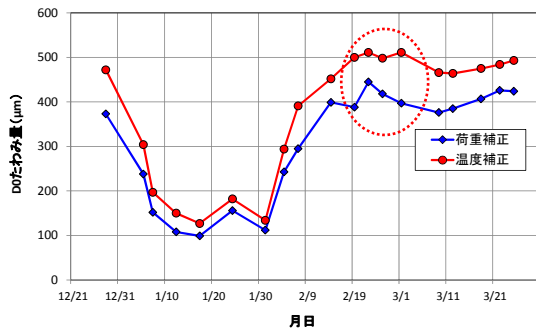


図-16 FWD 試験結果 (苦小牧1工区)

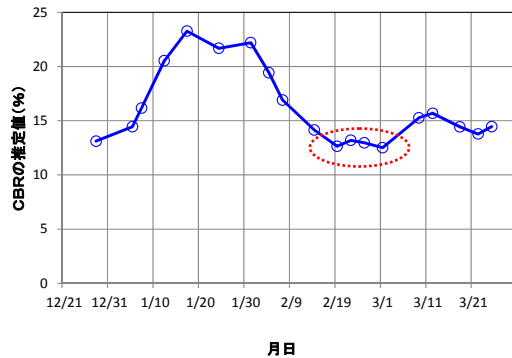


図-17 CBR の推定値 (苦小牧1工区)

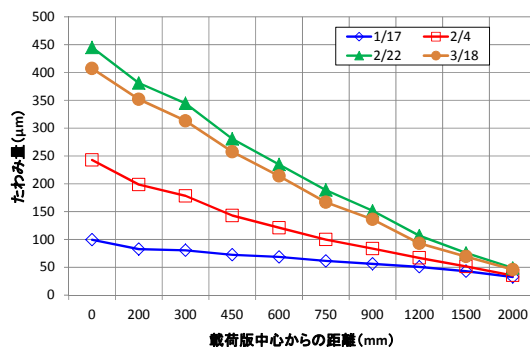


図-18 各センサーのたわみ量 (苦小牧1工区)

期に測定した値の代表的なものを抽出し示した。厳冬の1月17日に測定した値は、全てのセンサーのたわみ量が小さく、各センサーの値を結んだ線形も直線に近く、表層と路床が硬い場合のたわみ量の分布となっている。

融解期に測定した2月22日、3月18日のたわみ量は厳冬期と比較し、たわみ量が多い。今回の測定では、表層が硬く路床の支持力が低下しているため、全体的にたわみ量が多く、各センサーの値を結んだ線形も直線となっている。一般的に表層が軟らかく、路床が軟らかい場合は、載荷版付近に局部的に大きな変位が見られる傾向にある<sup>6)</sup>。

## 6. まとめ

理論的設計方法等の試験施工箇所から得られた知見を以下に示す。

### (1) アスファルト混合物層の温度の推定

試験施工箇所の実測温度とアメダスデータから推定したアスファルト混合物層の温度を比較した結果、温度領域、舗装厚、試験施工箇所の位置、混合物種類が異なっても、実測温度と推定温度の温度差は $-2\sim+2^{\circ}\text{C}$ 程度であり、アメダスデータの気温データを用い、(1)式によりアスファルト混合物層の温度を推定しても比較的精度良く温度を推定できることが確認された。

### (2) アスファルト混合物層の弾性係数

理論的設計方法による舗装設計を行う場合、設計する箇所のアスファルト混合物層の月別の温度を算出する必要があるが、試験施工箇所の月別の温度を実験式に入力することにより弾性係数を推定した結果、 $2000\sim 8000\text{MPa}$ 程度であり、季節な変動が大きいことが確認された。

### (3) 融解期の支持力低下の期間

水分計により融解期を推定した結果、苦小牧市における融解期間は2月中旬から4月上旬頃で、最大2ヶ月程度である。また、稚内市における融解期間と判断できる区間は3月中旬から5月上旬頃で、最大2ヶ月程度である。稚内市と苦小牧市の融解期間は概ね同程度であるが、融解期の開始と終了時期が異なり、気象条件により地域差があることが確認された。

また、FWD試験による評価では、厳冬期は路盤や路床が凍結しているため支持力が高く、融解期においては路床の水分の上昇に伴い支持力が低下することが確認された。

## 7. おわりに

アスファルト舗装の理論的設計方法は、性能規定化された「舗装の構造に関する技術基準」に則した設計方法である。現在は一般国道36号苦小牧市美々試験道路と一般国道235号稚内市声問の試験舗装の2箇所をみの施工実績であるが、今後試験データを蓄積し、積雪寒冷地における理論的設計方法によるアスファルト舗装の設計方法を確立していきたい。

## 参考文献

- (1) 社団法人日本道路協会：アスファルト舗装要綱、pp.3-21、1967.
- (2) 社団法人日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、pp.3-18、2001.
- (3) 社団法人日本道路協会：舗装設計便覧、pp.109-126、2006.
- (4) 丸山記美雄、熊谷政行：積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の疲労ひび割れ発生予測に関する研究、寒地土木研究所月報No682、pp.2-14、2010.
- (5) 国土交通省北海道開発局：北海道開発局 道路設計要領第1集道路、p.1-5-52、2016.
- (6) 特定非営利活動法人 舗装診断研究会：FWDによる舗装診断、pp.17-20、2014.