

動的載荷によるアスファルト舗装の挙動に関する一考察

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 安倍 隆二
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
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 木村 孝司

「舗装の構造に関する技術基準」¹⁾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。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。

本研究ではアスファルト舗装の理論的設計方法を活用し、耐久性の向上が期待される舗装断面を検討するための試験施工を行い、融解期や厳冬期において載荷試験等を実施した調査結果を報告するものである。

キーワード：アスファルト舗装、理論的設計方法、動的載荷、支持力低下

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」²⁾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」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。

本研究では苫小牧寒地試験道路においてアスファルト舗装の理論的設計方法を用い、耐久性の向上が期待される舗装断面を造成し、融解期や厳冬期において載荷試験等を実施した調査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³⁾では、アスファルト混合物層（以下、As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As層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As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。

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、設計期間、交通条件、環境条件、材料条件、基盤条件、信頼性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As層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。

3. 試験施工の概要

試験施工断面は、寒地土木研究所が所有する苫小牧寒地試験道路に造成した。図-1に試験施工の断面を示す。G工区は標準断面であり「北海道開発局道路設計要領」⁴⁾の10年設計、置換厚80cm、路床が土の場合に準拠した舗装構成である。C工区は耐久性の向上を目的とした断面であり、G工区と異なる点は、As層の最下層を

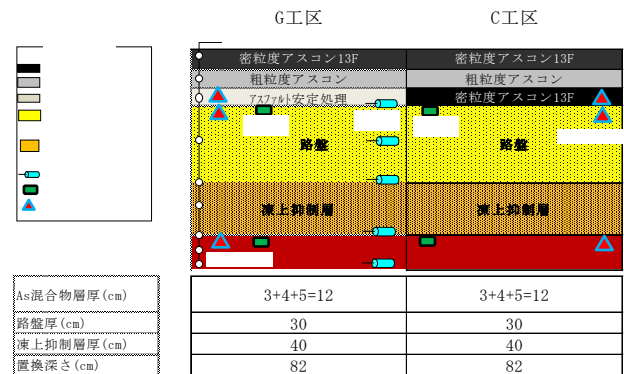


図-1 試験施工の断面

アスファルト安定処理の代わりに密粒度アスコン13Fを用いていることである。

(1)式は「舗装設計便覧」³⁾に掲載されているアスファルト混合物の暫定破壊規準式である。この式は最下層に用いる混合物の飽和度に大きく依存する。飽和度の高い混合物、すなわち、空隙率の低い混合物の耐久性は高くなる。密粒度アスコン13Fは配合設計時に目標空隙率を3～4%に設定し、アスファルト安定処理は目標空隙率を3～12%とするため、密粒度アスコン13Fを最下層に使用することにより耐久性の向上が期待できる。苫小牧寒地試験道路で試験施工した配合設計による密粒度アスコン13Fの空隙率は3.6%、アスファルト安定処理6.9%であり、密粒度アスコン13Fの空隙率はアスファルト安定処理と比較し3%程度低い結果となっている。

$$N_{fa} = 18.4 \times (C) \times \{6.167 \times 10^{-5} \times \varepsilon_t^{-3.291} \times E^{-0.854}\} \quad (1)$$

ここに、

N_{fa} : 許容標準輪(軸)数

C : As層の最下層に使用する混合物の容積特性に関するパラメータ

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \times \left[\frac{VFA}{100} - 0.69 \right]$$

VFA : 飽和度 (%)

ε_t : As層下面の引張りひずみ

E : As層の最下層に使用する混合物の弾性係数 (MPa)

試験施工区間には、地中温度を計測する熱電対、凍結深さを計測する凍結深度計、含水比を計測するための水分計を設置した。また、理論的設計方法による解析値と実測値を比較するため、ひずみ計や土圧計等を設置した。

表-1に試験施工の調査項目を示す。凍上や凍結深度等の環境条件を把握するため、地中温度、凍結深度・凍上量、水分量の計測を行った。また、FWDによるたわみ測定(以下、FWD試験)⁵⁾を行い、支持力の季節的な変動の把握や各層の弾性係数を逆解析により算出した。更に、総重量20tに調整したダンプトラックを走行させ、理論的設計方法によるひずみ等の解析値と実測値を比較した。

4. 試験施工の調査結果

(1) 凍結深度、凍上量、および水分量等の調査結果

図-2に2016年10月～2017年3月までの地中温度計測結果を示す。温度計測は熱電対を用いて測定を行った。2016年度の最大凍結深さは熱電対による温度測定では67～82cmの範囲にあり、凍上抑制層まで凍結した。図-3に凍結深さ・凍上量の調査結果を示す。凍結深度計によ

表-1 試験施工の調査項目

調査項目	調査内容	調査目的
地中温度の計測	・アスファルト層、下層路盤、凍上抑制層、路床の温度計測	・舗装体温度の把握
凍結深度・凍上量の測定	・凍結深度・凍上量の測定	・凍結深度や凍上量の把握
水分量の計測	・下層路盤、凍上抑制層、路床に含まれている水分量の計測	・下層路盤、凍上抑制層、路床における水分量の変動の把握
FWDによるたわみ測定	・舗装表面のたわみ量の測定	・支持力の把握
	・逆解析による弾性係数の算出	・各層の弾性係数の把握
20tダンプによる走行試験	・20tダンプトラック(時速5km/h、20km/h)の走行時におけるひずみ・変位・土圧の測定	・解析値と実測値の比較

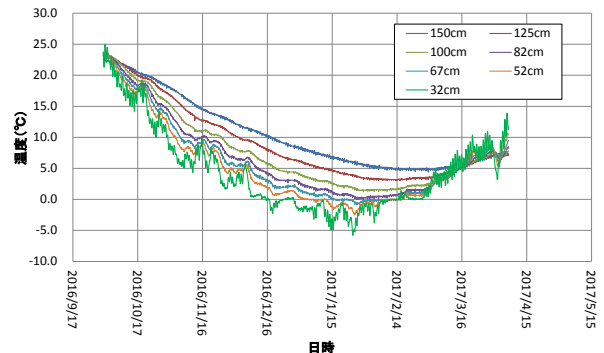


図-2 地中温度の計測結果(切込砕石・路床)

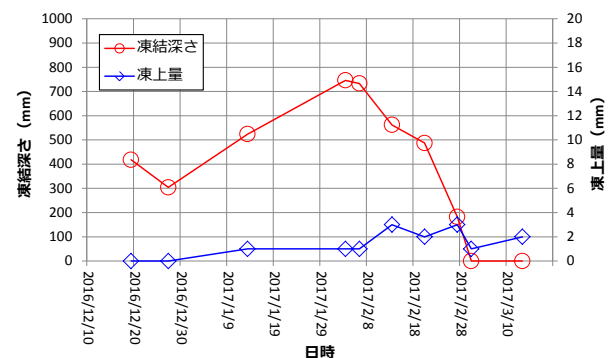


図-3 凍結深さ・凍上量の調査結果

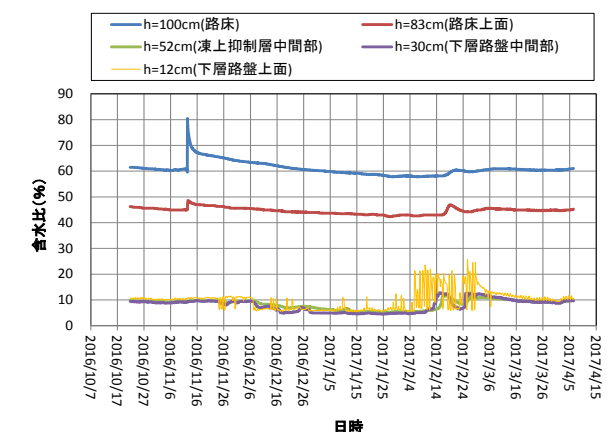


図-4 含水比の計測結果

る凍結最大深さは75cmであり、2月中旬～下旬に計測された。最大凍上量については3mmであり、2月中旬～下旬頃に測定された。図-4に含水比の計測結果を示す。下層路盤上面部の含水比の上昇は2月上旬～下旬にかけて大きく変動していることが確認できた。これは舗装表面の日射や外気温の影響から路盤上面部が融解し、含水比が変動したと推察される。下層路盤中間部、凍上抑制層中間部、および路床上面は、2月中旬～下旬の時期に含水比が上昇していることが確認された。

(2) FWD試験

FWD試験は厳冬期や融解期の支持力を評価するために実施した。図-5にFWD試験の調査結果を示す。図に示す D_0 たわみ量は荷重補正、温度補正を行ったものである。初期値は下層路盤や路床が未凍結である時期の10月下旬に実施し、G工区およびC工区の D_0 たわみ量は $500\mu\text{m}$ 程度であった。12月中旬頃は下層路盤まで凍結した影響により $200\sim 300\mu\text{m}$ 程度となり、厳冬期の1月中旬～2月上旬は凍上抑制層まで凍結し $100\mu\text{m}$ 程度と支持力が増加する状況が確認された。2月中旬頃以降には下層路盤および凍上抑制層が融解し $500\sim 600\mu\text{m}$ 程度となり、初期値と比較し支持力が低下していることが確認された。

次に静的逆解析プログラム (BALM) によりFWD試験のたわみ量を用いて逆解析を行い、各層の弾性係数を算出した。表-2に静的逆解析プログラム (BALM) の入力条件を示す。As層の弾性係数は、4点曲げ疲労試験⁹⁾から得られた (2) 式に現地調査時のAs層の温度を入力し算出した。

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

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)

下層路盤や凍上抑制層は同じ粒状材料として、初期値を 200MPa に設定し、室内試験で実施した路床土の凍結融解後のCBR値を(3)式³⁾に代入して算出した。

$$E=10CBR \quad (3)$$

ここに、

E : 弾性係数 (MPa)

図-6にFWD試験の逆解析結果を示す。(2)式を用いて算出したAs層の初期値は 4497MPa であり、厳冬期の1月中旬～2月上旬頃は寒冷な気象条件のため 7500MPa 程度に上昇し、2月上旬頃から弾性係数は低下し、3月末には 4000MPa 程度の値を示した。粒状材料については、初期値 212MPa から厳冬期 2600MPa 程度に上昇し、融解期は

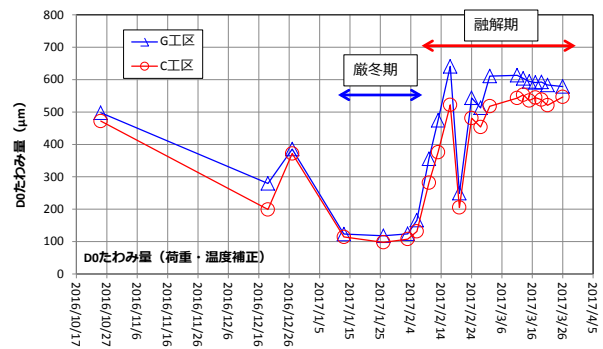


図-5 FWD試験結果

表-2 静的逆解析プログラム (BALM) の入力条件

静的逆解析プログラム BALM	
①舗装厚	As層12cm、下層路盤30cm、凍上抑制層40cm(粒状路盤70cm)、路床100cm
②各層の弾性係数初期値 (MPa)	・As混合物層: 寒地土木研究所の推定式 ・粒状材料: 200 ・路床: 40 ・基盤: 500
③各層のポアソン比	・As混合物層: 0.35 ・粒状路盤: 0.35 ・路床: 0.40 ・基盤: 0.40
④層間すべり率	0

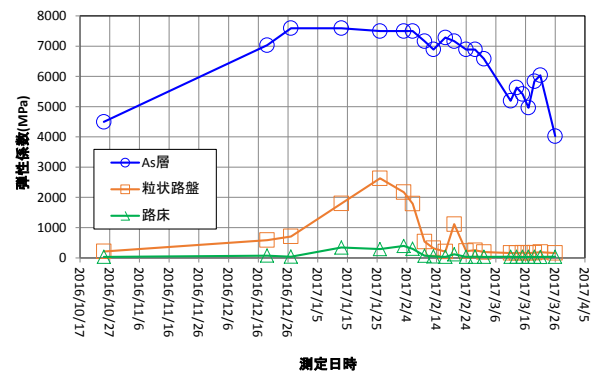


図-6 FWD試験の逆解析結果

表-3 多層弾性解析プログラム (GAMES) の入力条件

多層弾性解析プログラム GAMES	
①舗装厚	As層12cm、下層路盤30cm、凍上抑制層40cm(粒状路盤70cm)、路床100cm
②各層の弾性係数初期値 (MPa)	・As混合物層: 寒地土木研究所の推定式 ・粒状材料: 逆解析の値 ・路床: 逆解析の値 ・基盤: 逆解析の値
③各層のポアソン比	・As混合物層: 0.35 ・粒状路盤: 0.35 ・路床: 0.40 ・基盤: 0.40
④層間すべり率	0
⑤載荷荷重	複輪の1輪: 17.85kN
⑥タイヤの半径	・10.9cm

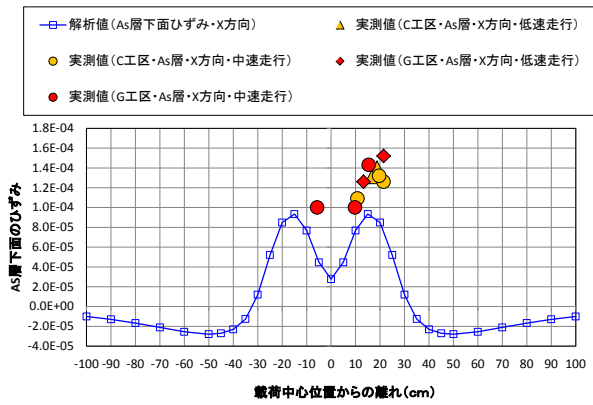


図-7 As層下面部のひずみ・X方向（複輪載荷）

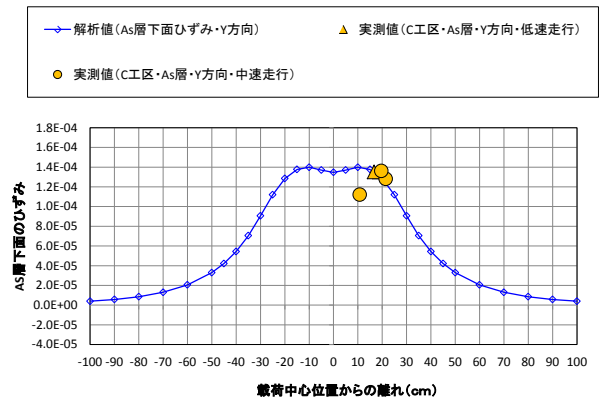


図-8 As層下面部のひずみ・Y方向（複輪載荷）

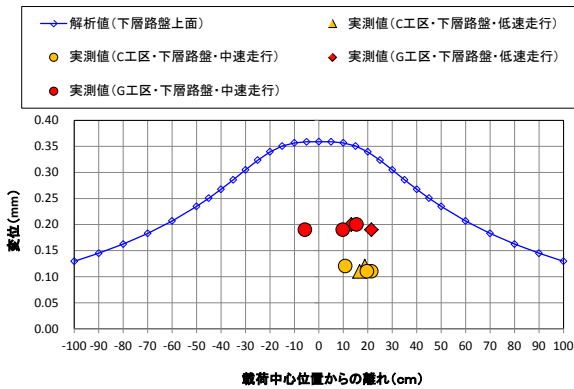


図-9 下層路盤上面部の変位量（複輪載荷）

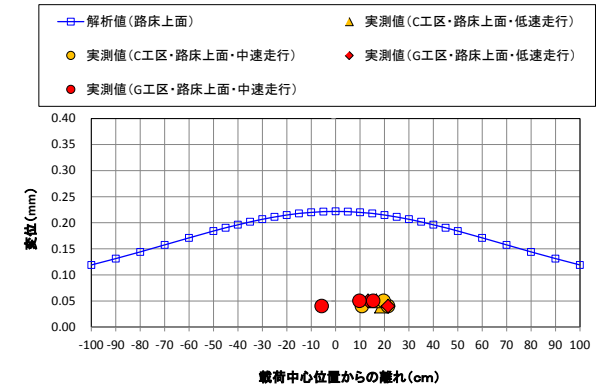


図-10 路床上面部の変位量（複輪載荷）

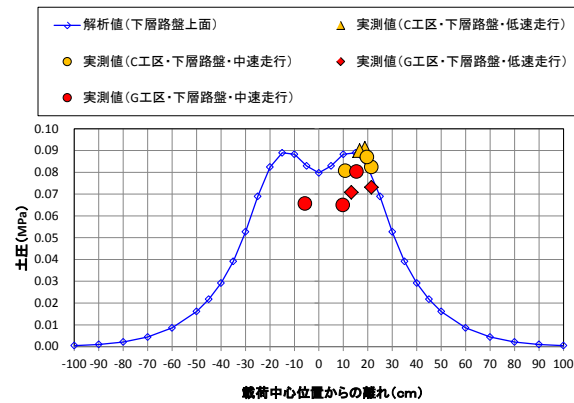


図-11 下層路盤上面部の土圧（複輪載荷）

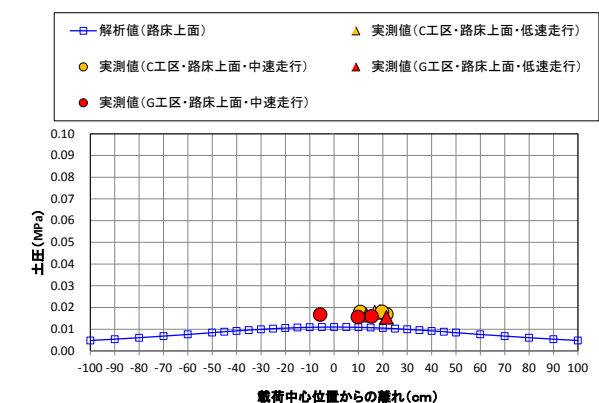


図-12 路床上面部の土圧（複輪載荷）

160MPa程度となり初期値と比較しやや小さい値を示した。路床は初期値33MPa、融解期は30MPa程度を示し、支持力の変動が見られない結果となった。厳冬期における路床の弾性係数は最大400MPa程度に上昇したが、路床には凍結が入っていないため厳冬期の解析結果は現地を再現していないと推察される。

(3) 20tダンプトラックによる走行試験

a) 複輪載荷

走行試験は総重量20tダンプトラックがAs層上を低速（5～10km/h）や中速（11～20km/h）で走行し、As層下面に

発生するひずみ、下層路盤および路床の上面部に発生する変位、下層路盤および路床の上面部に作用する土圧を計測した。解析値は多層弾性解析プログラム（GAMES）⁷⁾により算出し、実測値と比較した。多層弾性解析プログラムの入力条件を表-3に示す。As層の弾性係数は（2）式より算出した。粒状材料、路床、基盤の弾性係数は、走行試験と同一日に測定したFWD試験データの逆解析値を用いた。載荷荷重やタイヤの半径は実測値を使用した。

図-7に複輪載荷時におけるX方向（道路横断方向）の

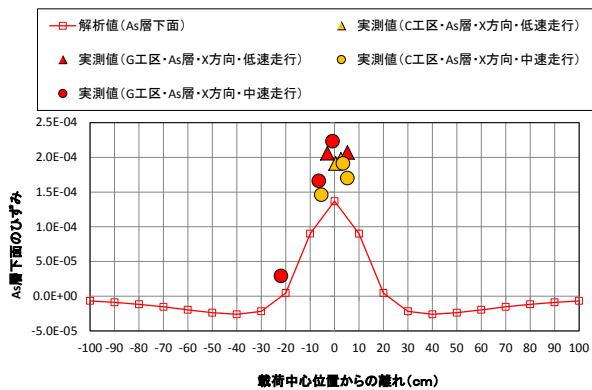


図-13 As層下面のひずみ・X方向・単輪載荷

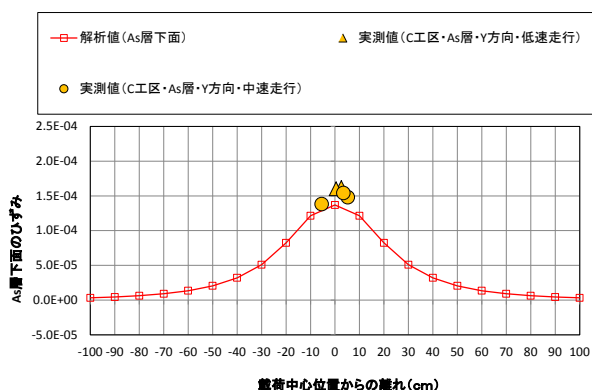


図-14 As層下面のひずみ・Y方向・単輪載荷

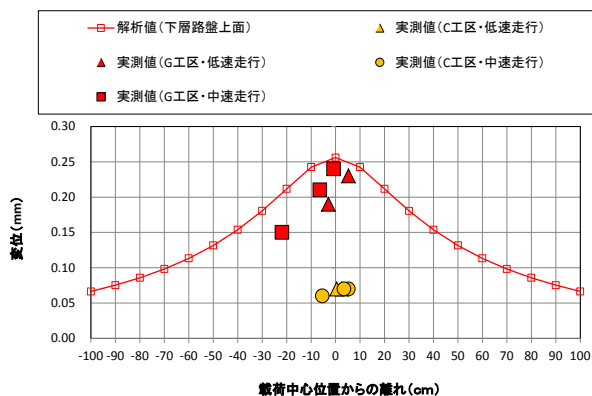


図-15 下層路盤上面の変位量 (単輪載荷)

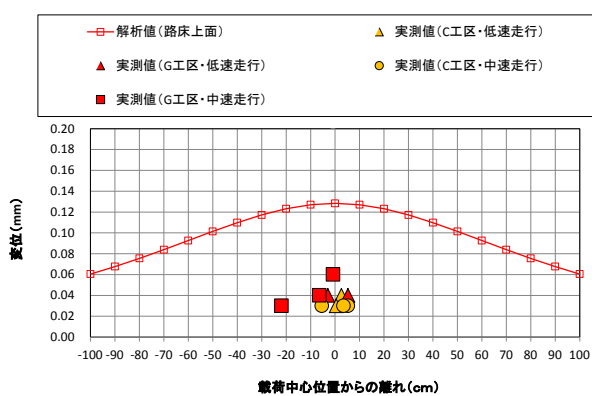


図-16 路床上面の変位量 (単輪載荷)

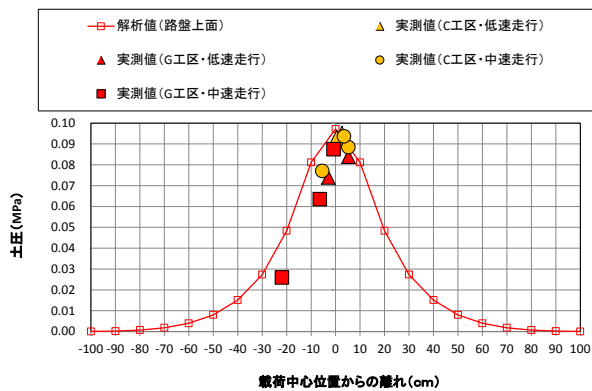


図-17 下層路盤上面の土圧 (単輪載荷)

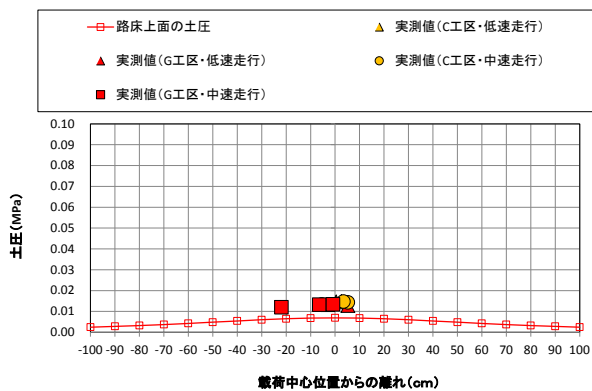


図-18 路床上面の土圧 (単輪載荷)

As層下面に発生するひずみ、図-8にY方向（道路縦断方向）に発生するひずみの解析値と実測値を示す。X方向に発生する解析ひずみは複輪のタイヤ直下で最大ひずみが発生し、複輪のタイヤ間の中心位置ではひずみが半分程度となる。ひずみの分布は凸部が2個ある形状となる。一方、Y方向に発生するひずみはX方向に発生するひずみとは異なり、ひずみの分布は凸部が1つある形状となる。最大ひずみの解析値はX方向とY方向を比較すると、Y方向がX方向と比較し40 μ m程度大きくなる。なお、G工区とC工区の解析ひずみはAs層厚が同一である

ため同じになる。図-7に示すX方向のAs層下面に発生する引張ひずみは、解析値と比較し大きい傾向が見られ、最大で60 μ m程度大きい結果となった。また、低速と中速の走行速度で走行試験を実施したが、速度の影響は明確ではなかった。図-8に示すC工区のAs層下面のY方向に発生した引張りひずみは、解析値と比較し同程度である。

図-9に下層路盤上面部の変位量、図-10に路床上面部の変位量を示す。下層路盤上面部に発生する解析値の最大値は0.36mm、路床上面部に発生する変位量の解析値

の最大値は0.22mmとなる。走行試験時の下層路盤上面部に発生したG工区の最大変位量は解析値の1/2程度、C工区は1/3程度となり、実測値が解析値と比較し小さい値を示した。また、走行試験時の路床上上面部の変位量は、解析値と比較し1/4程度の小さい値を示した。

図-11に下層路盤上面部の土圧、図-12に路床上上面部に作用する土圧を示す。走行試験時の下層路盤上面部に作用したC工区の土圧は概ね一致した。G工区は解析値と比較しやや小さい値を示した。走行試験時の路床上上面部に作用した土圧はC工区、G工区ともに解析値と同程度の値を示した。

b) 単輪載荷

図-13に単輪載荷時におけるX方向（道路横断方向）のAs層下面に発生するひずみ、図-14にY方向（道路縦断方向）に発生するひずみの解析値と実測値を示す。X方向、Y方向に発生する解析ひずみは複輪載荷とは異なり、タイヤ直下で最大ひずみが発生しひずみの分布は凸部が1個ある形状となる。最大ひずみの解析値はX方向とY方向は同じである。図-13に示すX方向のAs層下面に発生する引張りひずみは、解析値と比較し大きい傾向が見られた。また、複輪載荷と同様に走行速度の影響は明確ではなかった。図-14に示すC工区のAs層下面のY方向に発生した引張りひずみは、解析値と比較し同程度であり、複輪載荷と同様な結果が得られた。

図-15に下層路盤上面部の変位量、図-16に路床上上面部の変位量を示す。下層路盤上面部に発生する解析値の最大値は0.26mm、路床上上面部に発生する変位量の解析値の最大値は0.13mmとなる。走行試験時の下層路盤上面部に発生したG工区の最大変位量は解析値よりやや小さい程度、C工区は1/5程度となり、C工区とG工区は異なる傾向となった。また、走行試験時の路床上上面部の変位量は、解析値と比較し1/3程度の小さい値を示した。

図-17に下層路盤上面部の土圧、図-18に路床上上面部に作用する土圧を示す。走行試験時の下層路盤上面部に作用したC工区とG工区の土圧は概ね一致した。また、走行試験時の路床上上面部に作用した土圧はC工区、G工区ともに解析値と同程度の値を示した。

5. まとめ

現地調査の結果、以下のことが確認された。

- 1) 2016年度における苫小牧寒地試験道路の最大凍結深さは75cm、最大凍上量は3mmであった。含水比については、融解期において下層路盤、凍上抑制層、および路床土における含水比の上昇が見られた。特に下層路盤上面部の融解期の変動が顕著であることが確認された。
- 2) FWD試験の結果、厳冬期は下層路盤や凍上抑制層が凍結し支持力が増加した。一方、融解期は含水比の上昇に伴い支持力が低下することが確認された。また、FWDデータを用い静的逆解析を行った結果、

粒状材料の弾性係数は初期値212MPa、厳冬期2600MPa、融解期160MPaを示し、季節的な変動が把握できた。路床土については、路床に凍結が入らなかったことから融解期の支持力低下による弾性係数の低下は見られなかった。

- 3) 複輪載荷や単輪載荷時のAs層下面に発生した引張りひずみは、X方向はやや大きい値を示し、Y方向は解析値と同程度の値を示した。
- 4) 複輪載荷や単輪載荷時の下層路盤上面部に発生した変位量は、解析値と比較し小さい値のものが多く結果となった。また、路床土上面部についても同様な結果が得られた。
- 5) 複輪載荷や単輪載荷時の下層路盤上面部に作用した土圧は、解析値と比較し同程度となった。また、路床土上面部についても同様な結果が得られた。

6. 今後の予定

今回報告した調査は単年度の融解期における調査結果であるため、今後データを蓄積していく予定である。また、供用している国道においてもAs層下面に密粒度アスコン13Fを施工している箇所もあるので、現道のデータ、室内試験のデータ等を蓄積し、耐久性の向上が期待できる舗装構成を提案していきたい。

参考文献

- (1) 公益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.3-17、2001。
- (2) 公益社団法人日本道路協会：アスファルト舗装要綱、pp.3-21、1967。
- (3) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧、pp.109-127、pp.289-291、2006。
- (4) 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.1-5-62、2017。
- (5) 公益社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第1分冊〕、pp.[1]-234-240、2007。
- (6) 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。
- (7) 公益社団法人土木学会：舗装工学ライブラリー3 多層弾性理論による舗装構造解析入門-GAMES(General Analysis of Multi-layered Elastic Systems)を利用して、2005。