

第3章 環境負荷を与えたアスファルトの
粘弾性状の変化に関する研究

第3章 環境負荷を与えたアスファルトの粘弾性状の変化に関する研究

3. 1 緒 言

第2章では、現地調査の結果から、特に非健全部において基層あるいはアスファルト安定処理層に含まれるアスファルトも著しく劣化していることが確認された。この要因として、空隙からの空気の影響あるいはアスファルト舗装中に雨水が浸透することで、酸化劣化が促進されることが考えられる。そこで、本現象について検証するため、空隙率や散水条件を変えた混合物による促進劣化試験を実施することとした。

さらに、バイнда単体を回転式薄膜加熱試験（RTFOT）と加圧劣化試験（PAV）により促進劣化させ、供用後のバイнда性状と室内における促進劣化試験後のバイнда性状との比較を行い、劣化条件と供用後のアスファルトの劣化性状について考察した。

3. 2 促進劣化方法

3. 2. 1 混合物を用いた促進劣化方法

混合物やバインダの種類を変えてホイールトラッキング供試体を作製し、その供試体を60°Cの恒温槽内に長期間静置する促進劣化試験を行った。

促進劣化させた試験機は、促進耐候性試験機（Super Win-mini:ダイプラ・ウィンテス製）を紫外線照射せずに用いた。この時、雨水による影響を確認するため、定期的に散水したものと非散水のものについて試験を行った。ここでの散水量は、混合物の表面全面に水膜が形成されない程度に設定した。表-3.1に促進劣化試験機の概要、表-3.2に混合物の試験概要、写真-3.1に試験状況を示す。

表 - 3.1 促進紫外線劣化試験機の概要

型 式	SWM-03
	ダイプラウィンテス
試験方法	小型メタハラ式人工耐光(候)性試験機
ランプ	空冷式メタルハライドランプ
波長領域	295nm～780nm
照射照度	450W/m ²
積算照射量	486MJ/m ²
散水量	200ml (1サイクル)
照射時間	300時間 (150サイクル)

表-3.2 混合物を用いた促進劣化試験の概要

項目		内容			
混合物	配合	アスファルト安定 処理混合物	密粒度 混合物(13)	ポーラスアスファ ルト混合物(13)	
	アスファルト量	%	3.7	5.2	4.9
	空隙率	%	7.0	4.0	20.0
散水条件	水量	ml/min.	100		
	噴射時間		120分間ごとに30秒		
試験温度		℃	60		
試験サイクル			360回(30日)		

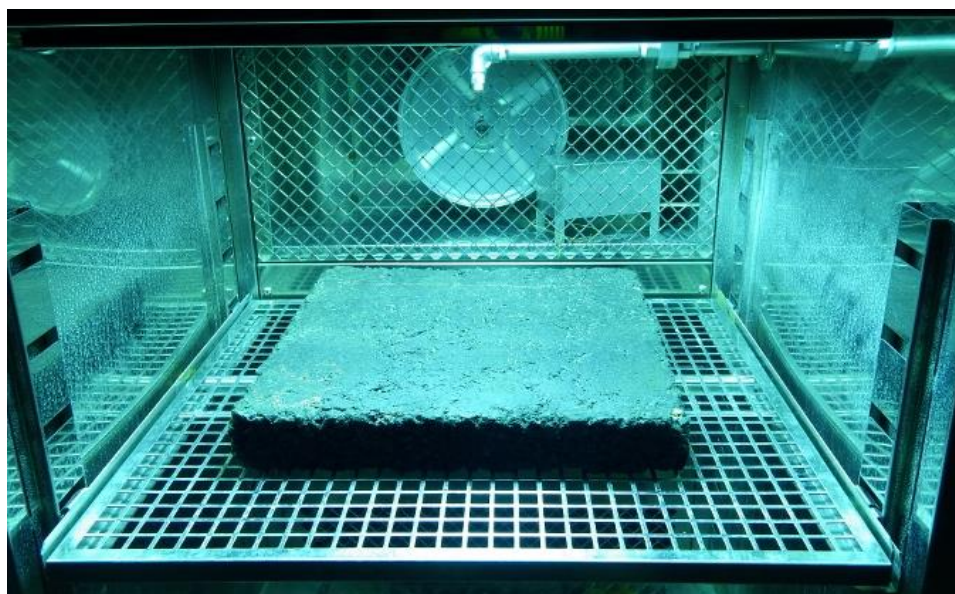


写真- 3.1 促進紫外線劣化試験機による試験状況

3. 2. 2 バインダ単体の促進劣化方法

促進劣化試験として、回転式薄膜加熱試験 (RTFOT:ASTMD 2872 準拠) と、RTFOT 試験を行った試料に対しさらに加圧劣化試験 (PAV:ASTMD 6521 準拠) を行った。PAV 試験は、試験時間を 20 時間, 40 時間, 60 時間と変化させた。

未劣化の試料と促進劣化試験後の試料について、針入度, 軟化点, 伸度および DSR 試験を行った。

3. 3 使用材料

(1) バインダ性状

評価した混合物は、アスファルト安定処理用混合物, 密粒度, ポーラスである。これらの混合物に対し、一般的なストアス 60-80 およびスチレンブタジエンブロック共重合体 (SBS) を用いてポリマー改質アスファルト II 型相当 (以下, 改質 II 型) と改質 H 型相当のバインダを作製し、これらを用いて試験を行った。表 - 3.3 に、SBS の添加量とバインダの代表性状を示す。促進劣化試験を行った混合物から、2 章と同様な方法によりアスファルトを抽出し性状試験を行った。

表-3.3 促進劣化試験に用いたバインダの概要

試験項目	試験温度	ストアス 60-80	改質 II 型相当	改質 H 型相当	
SBS 添加量	%	-	0	4.5	8
針入度	1/10mm	25°C	61	54	51
軟化点	°C	-	47.0	58.5	85.0
伸度	cm	15°C	100+	100+	100+
タフネス	N・m	25°C	5.3	23.5	24.6
テナシティ	N・m	25°C	0.6	16.8	18.0

第3章 環境負荷を与えたアスファルトの粘弾性状の変化に関する研究

(2) 混合物の概要

表-3.4 に使用した骨材の性状一覧，表-3.5 に混合物の配合を示す．混合物はマーシャル試験により最適アスファルト量を設定した．

表 - 3.4 使用した骨材の性状

使用材料	種類	4号砕石	5号砕石	6号砕石	7号砕石	粗目砂	細目砂	砕砂	石粉
	材質	硬質砂岩	硬質砂岩	硬質砂岩	硬質砂岩	天然砂	天然砂	硬質砂岩	石灰岩
	産地	茨城県石岡市	茨城県石岡市	茨城県石岡市	茨城県桜川市	埼玉県川越市	千葉県香取市	茨城県笠間市	栃木県佐野市
通過質量百分率(%)	37.5	100							
	31.5	99.31							
	26.5	79.8	100						
	19	6.3	81.3	100					
	13.2	0.1	5.3	92.6	100	100			
	4.75			4.5	86.6	100	100	100	100
	2.36				19.5	94.6	98.7	85.1	100
	0.6				4.4	32.4	82.5	35.1	100
	0.3					11.8	47.7	17.7	100
0.15					2.3	6.2	7.6	98	
表乾密度	g/cm ³	2.710	2.711	2.692	2.657	2.567	2.526	2.675	
かさ密度	g/cm ³	2.700	2.701	2.67	2.636	2.535	2.446	2.652	
見掛密度	g/cm ³	2.725	2.728	2.722	2.691	2.62	2.657	2.713	2.76
吸水率	%	0.339	0.37	0.72	0.77	1.29	3.25	0.84	

表-3.5 混合物の配合一覧

混合物の種類	アスファルト安定処理(30)	密粒度(13)	ポーラス(13)
骨材配合	4号砕石	23.0	-
	5号砕石	13.0	-
	6号砕石	12.0	33.0
	7号砕石	12.0	23.0
	粗砂	-	6.0
	細砂	17.0	11.0
	砕砂	17.0	21.0
	石粉	6.0	6.0
			5.0

3. 4 評価結果

3. 4. 1 促進劣化試験後のバイнда性状試験結果

促進劣化試験後の混合物からアスファルトを抽出し、針入度試験を行った。針入度については未劣化の針入度と劣化後の針入度から針入度残留率を求めた。

図 - 3.1 に、促進劣化させた混合物から抽出したアスファルトの針入度の変化を示す。

既往の試験結果 [1] と同様に、空隙の大きいアスファルト安定処理混合物に含まれるストアスでは、針入度の低下が早いことが確認された。空隙率が比較的低い密粒度の場合、アスファルト安定処理混合物と比較し、針入度の低下が抑制されていることがわかる。ポーラスでは、改質 H 型を使用しているにもかかわらず、密粒度でのストアスや改質 II 型と同程度の針入度残留率であった。

散水の有無については、今回の試験条件では影響はそれほど大きくなく、むしろ非散水条件と比較し、すべての条件で針入度が高い結果となった。この原因として、空隙に水分が滞在し、空気との接触が妨げられたことにより酸化劣化が抑制されたものと考えられる。これは散水条件により結果が異なる可能性があるため、さらに時間や条件を変えて検討する必要があると考える。

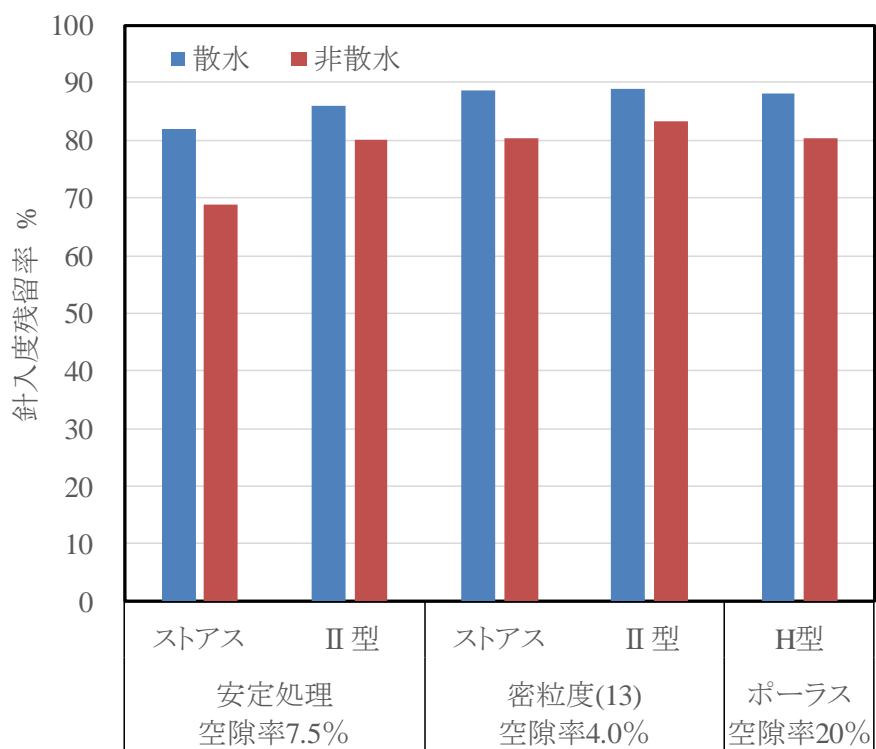


図 - 3.1 促進劣化させた混合物より抽出したアスファルトの針入度の変化

3. 4. 2 バインダ単体の促進劣化による評価結果

(1) 針入度および吸光度による比較

図 - 3. 2~3. 4 に，劣化に伴うバインダ性状の変化をそれぞれ示す。

劣化時間が長くなるにつれて各バインダの針入度は低下している。針入度の低下は，PAV40 時間までは改質アスファルトとストアスにはあまり差異は見られないが，40 時間以降では，ストアス，改質Ⅱ型，改質 H 型の順に針入度が低下していた。一方，赤外吸光分析の結果では，ストアスと改質アスファルトで吸光度の傾向に相違はなく，促進劣化することにより，同程度の値で推移していた。図 - 2. 15 で改質 H 型の吸光度が，ストアスに比べて小さい値となったことと本結果より，吸光度は，アスファルトの種類よりも供用年数に影響を受けると考えられる。

ストアスの PAV40 時間における吸光度は 0.006 であり，この値は，図 - 2. 14 に示す供用 14 年から 19 年の表層，基層およびアスファルト安定処理層より抽出したアスファルトの吸光度の平均値と同程度の値であった。PAV20 時間で供用 5~10 年を想定していることを考えると [2] [3]，概ね推定される供用年数となっていることを確認した。

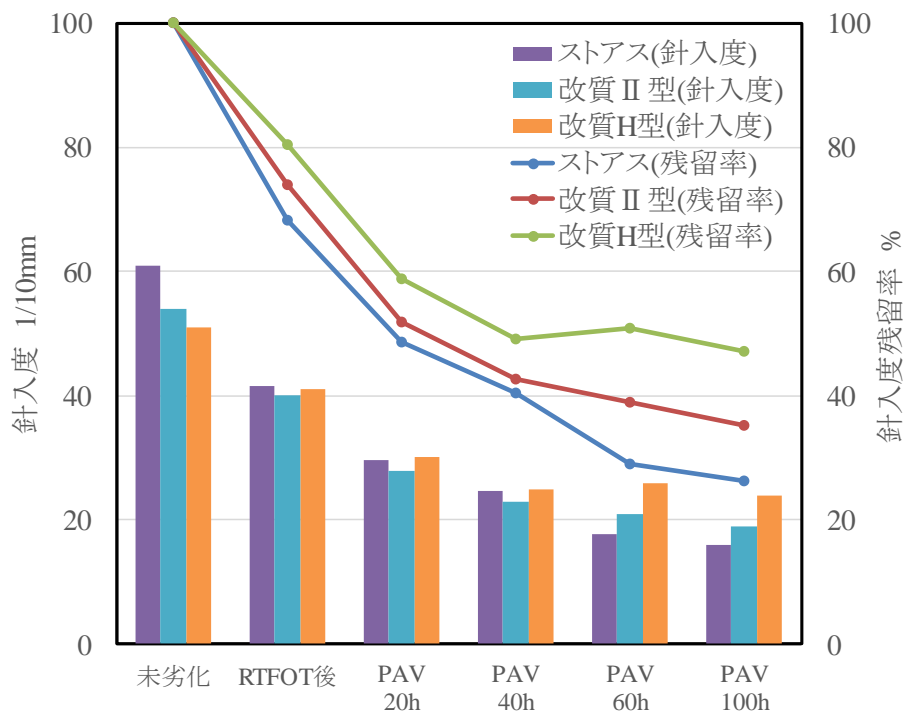


図 - 3.2 バインダ単体の促進劣化に伴う針入度の変化

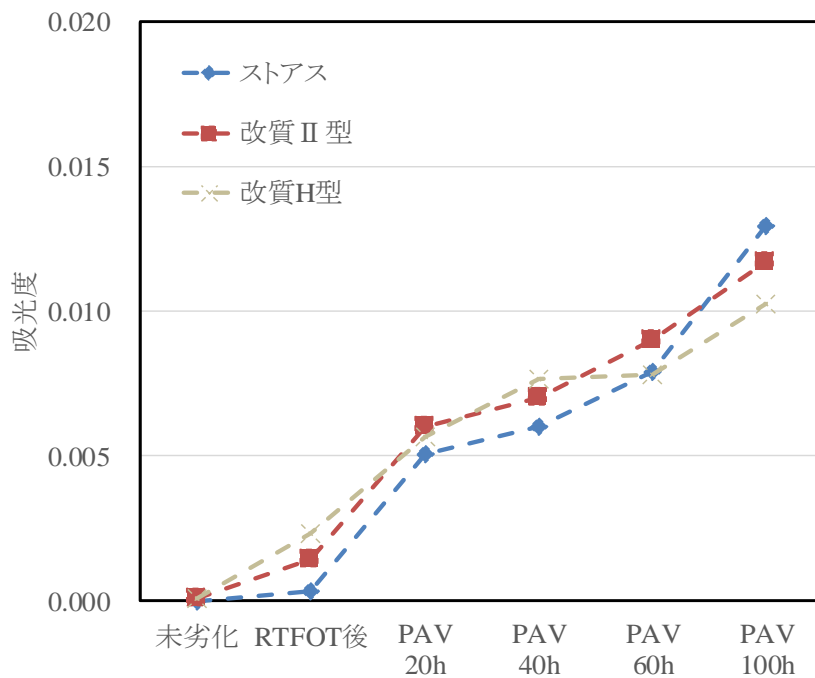


図 - 3.3 バインダ単体の促進劣化に伴う吸光度の変化

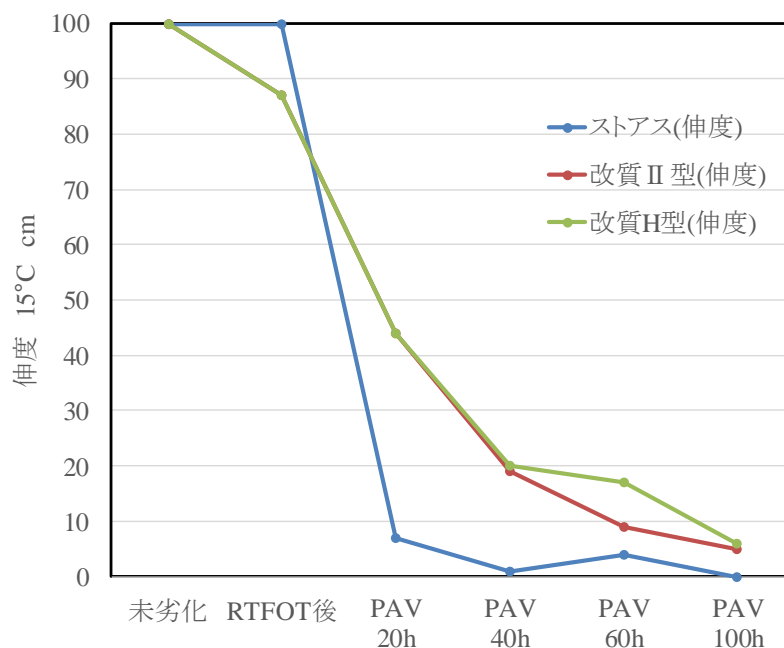


図-3.4 バインダ単体の促進劣化に伴う伸度の変化

バインダ単体の促進劣化試験では、既往の研究 [4] [5] [6] でも述べられている通り、改質アスファルトのほうが針入度の低下は遅いが、混合物の種類を考慮した促進劣化試験の結果では、必ずしも改質アスファルトのほうが針入度の低下が遅いとは限らない。このことから、実際の舗装で生じるアスファルトの劣化を再現するには、混合物配合を考慮する必要があると考えられる。

(2) アスファルトのスティフネスの評価結果

表-3.6 に促進劣化試験後のストアスの性状試験結果を示す。

促進劣化させることでストアスの針入度が低下し、軟化点が上昇する。これらのことよりストアスの PI は高くなる。伸度は、RTFOT 試験後ではそれほど変化しないが、PAV 試験後では大幅に低下している。

図-3.5 に、促進劣化させたストアスの針入度、軟化点および PI からノモグラフを用いて算出した S_{bit} と DSR 試験により得られた各パラメータの関係を示す。 S_{bit} と DSR 試験から得られる複素せん断弾性率は非常に高い相関が見られ、両対数軸上で直線関係にあることが分かる。

図-3.6, 3.7 に DSR 試験から得られた各弾性率および位相角の関係を示す。

測定温度が高くなるか、または载荷時間が長くなるに伴い各弾性率はそれぞれ低下する。複素せん断弾性率や損失せん断弾性率と比較して、貯蔵せん断弾性率が最も低下が大きいことが分かる。

促進劣化時間が長くなるに伴い、アスファルトは弾性的性質が強くなるため、特に複素せん断弾性率が高い場合において、位相角は小さくなる傾向が見られた。(図-3.7)

表-3.6 促進劣化によるストアスの性状変化

試験項目			Original	RTFOT	PAV20h	PAV40h	PAV60h
針入度	25°C	1/10mm	61	42	30	25	18
軟化点	—	°C	48.0	51.0	57.0	60.0	62.5
伸度	15°C	cm	100+	100+	7	5	4
PI	—	—	-1.3	-1.3	-0.7	-0.5	-0.6

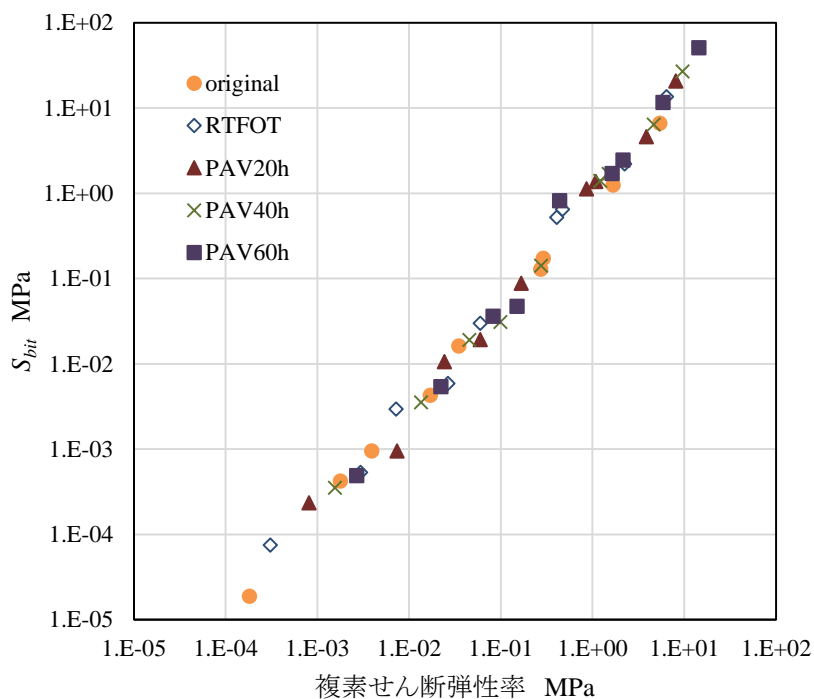


図-3.5 促進劣化後のアスファルトのスティフネスと複素せん断弾性率の関係

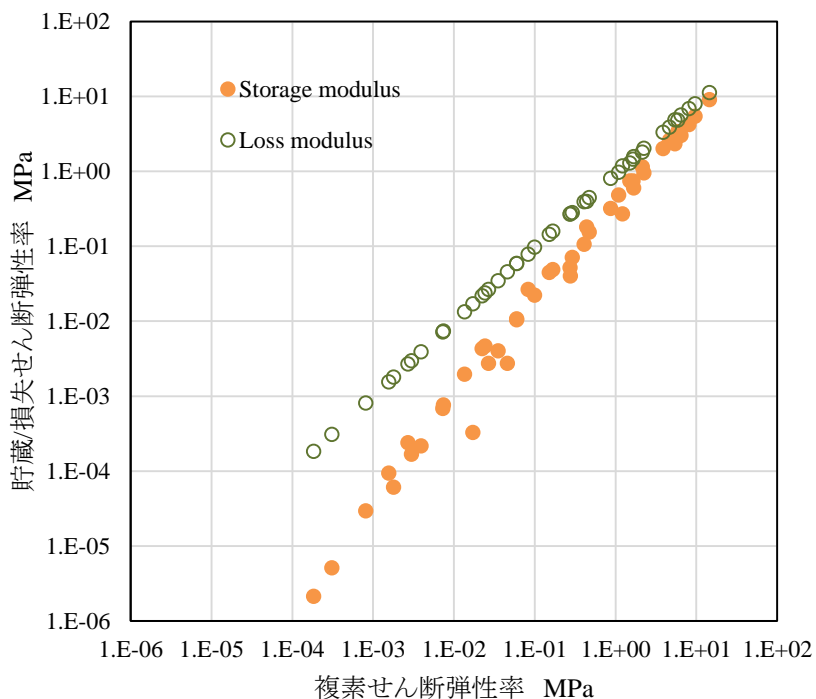


図-3.6 DSR より求めた複素せん断弾性率と貯蔵/損失せん断弾性率の関係

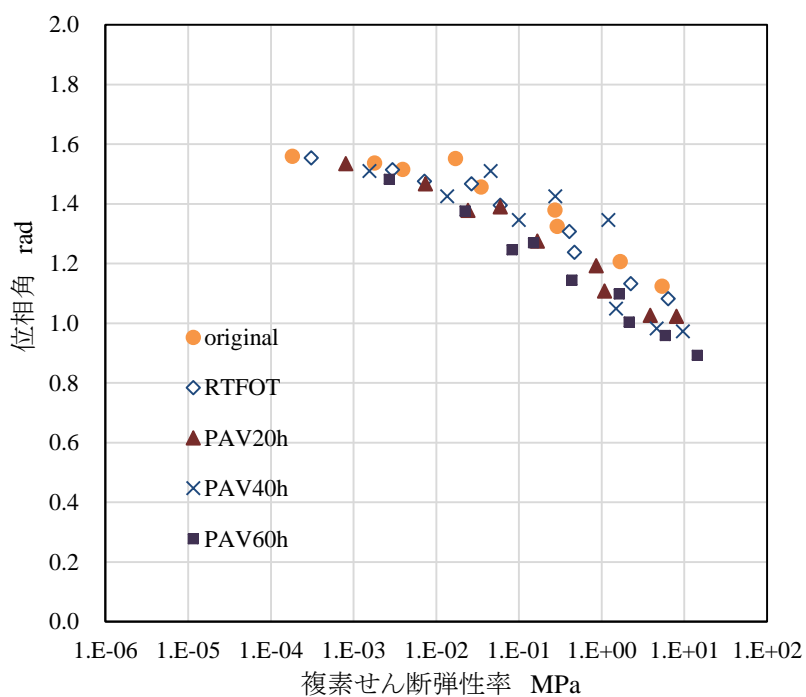


図-3.7 DSR より求めた複素せん断弾性率と位相角の関係

3. 5 現場から採取した試料との比較

バインダの促進劣化試験の結果と現場から採取した試料による結果について比較検証した。図-3.8 に促進劣化させたストアスの針入度、軟化点および PI からノモグラフを用いて算出した S_{bit} と DSR 試験により得られた複素せん断弾性率の関係を示す。図-3.8~3.11 に DSR 試験から得られた各弾性率および位相角の関係を示す。

試料は供用 19 年を経っており、使用したアスファルトも異なるが、室内試験により促進劣化試験で用いたストアスのスティフネスとほぼ同様な傾向が得られている。これらのことから室内試験で促進劣化させたアスファルトにより、供用劣化後のアスファルトのスティフネスあるいはスティフネスの変化を推定することが可能と考えられる。

近年、アスファルトを繰返し再生利用するケースが増えており、劣化が進行したアスファルトをアスコンに再利用する方法が課題となっている [7] [8] [9]。DSR 試験により、アスファルトの粘弾性状を把握することで再生利用するための新たな評価指標としての活用も期待できる。ただし、ノモグラフから得たスティフネスと複素せん断弾性率は 1 : 1 とはならない。これはノモグラフより推定するスティフネスは、針入度や軟化点など静的試験により推定しているのに対し、DSR 試験は動的試験であることおよびノモグラフでは試験温度 2 点により推定しているのに対し、DSR 試験では各温度で測定していることから値に若干の違いが生じるものと考えられる。

貯蔵せん断弾性率と複素せん断弾性率の関係を見ると、室内試験により促進劣化させた試料と現道より採取した試料でわずかに差異が見られた。一方、損失せん断弾性率と複素せん断弾性率の関係を見ると、測定温度、载荷時間、促進劣化させた試料と現場から得た試料、アスファルトの種類に関わらず、両対数軸上で直線関係にあることが明らかとなった。

複素せん断弾性率と位相角の関係は、室内試験による促進劣化後の試料と現地試料ではほぼ同様な傾向であった。

複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係は、室内における促進劣化させた試料、現地

採取した回収アスファルトあるいは回収改質 H 型についてすべて同一直線上で評価できることから、劣化程度の一つの指標となりえる。Anderson らは、フィールド試験において疲労ひび割れと $|G^*| \cdot \sin \delta$ の関係について調査しており、 $|G^*| \cdot \sin \delta$ が 3MPa 以上となるひび割れ率が高くなることを示している [10]。SHRP では、促進劣化後のアスファルトについて、損失せん断弾性率を表す $|G^*| \cdot \sin \delta$ が 5MPa 以下となることを一つの基準にしておる。これらの結果は、本研究で設定した DSR 試験の測定条件とは異なるが、概ね本試験結果と一致する [11]。

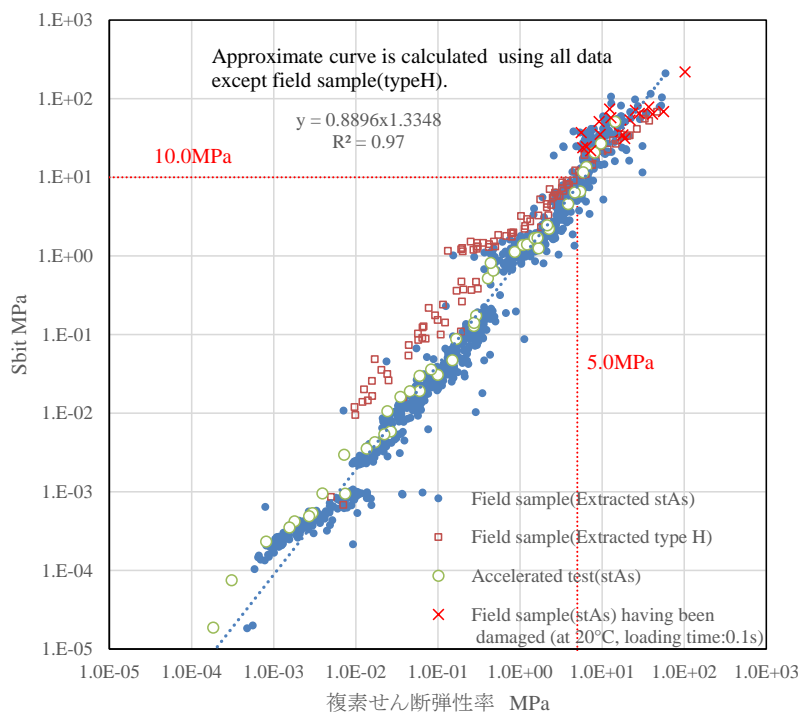


図-3.8 アスファルトのスティフネスと複素せん断弾性率の関係

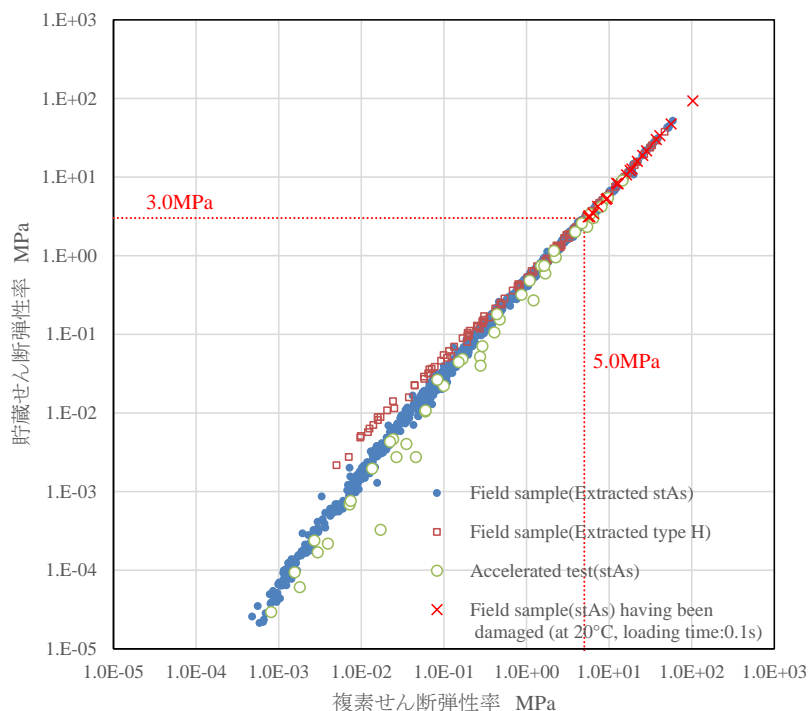


図-3.9 DSR より求めた複素せん断弾性率と貯蔵せん断弾性率の関係

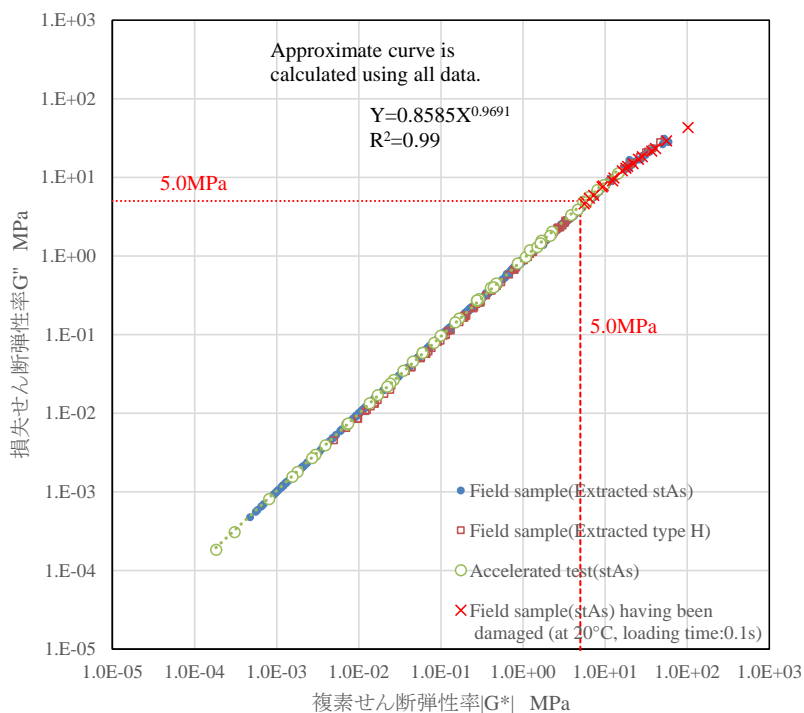


図-3.10 DSR より求めた複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係

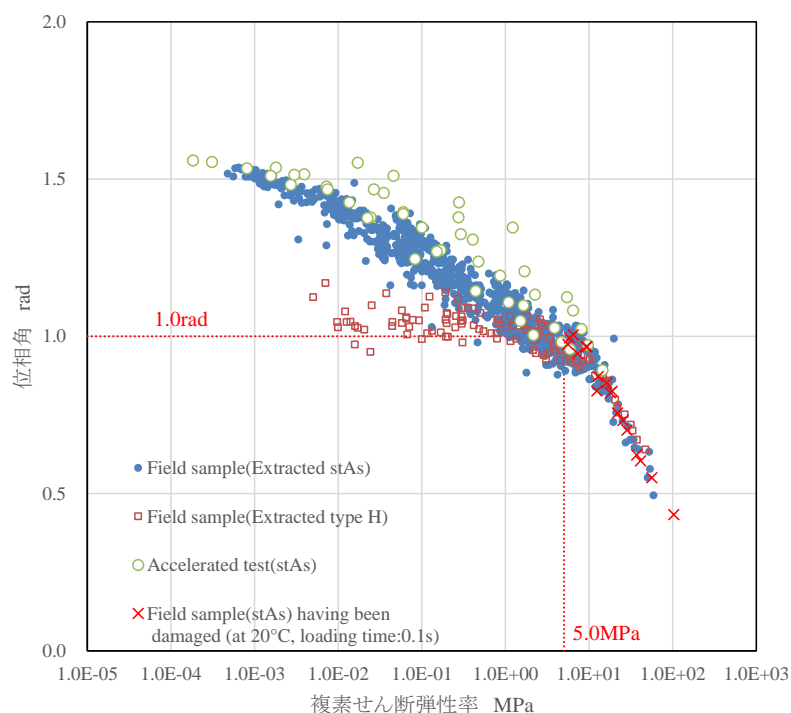


図-3.11 DSR より求めた複素せん断弾性率と位相角の関係

促進劣化含めた試験においても、アスファルトの種類、温度あるいは周波数に関わらず、DSR 試験により得られるアスファルトの複素せん断弾性率と損失せん断弾性率は両対数紙上で直線関係にあることを明らかにした。2.7.3 (2) で述べたように、劣化によるバインダの損失せん断弾性率の上昇を抑制することができれば、破壊に至るまでの载荷回数の下を抑制することを示す。さらに、複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係は、常温域 (20°C) から高温 (60°C) でかつ 0.1Hz から 10Hz までの载荷時間において、同一条件で比較できるため、アスファルトを再生利用する際に粘弾性状を幅広い範囲で把握することができる。

近年の研究では、改質アスファルトの疲労ひび割れ抵抗性の指標として損失せん断弾性率を採用することに疑問があると指摘されている [12] [13]。Bahia らは、 $|G^* \cdot \sin \delta$ がほぼ等しくなる温度でアスファルトのみの疲労試験を行っているが、初期の $|G^*|$ がほぼ同程度

のアスファルトであっても、その疲労挙動が異なることを実験により確認している [13]. さらに、混合物についても評価しており、 $|G^*| \cdot \sin \delta$ と混合物の疲労破壊までの回数についての相関が低いことを述べている [13]. しかし、これら結果は、疲労試験では周波数をすべて同一条件としている.

図-3.12~3.14 に温度別の損失せん断弾性率と周波数の関係を示す. 劣化することにより、各周波数において損失せん断弾性率が上昇する. このように同一の $|G^*| \cdot \sin \delta$ においても、周波数による影響がアスコンの疲労破壊回数に反映できない可能性がある. このため、本研究では、複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の利用方法の検討は劣化の進行程度の評価までとする. 今後は、周波数による損失せん断弾性率への影響を考慮し、アスファルトの複素せん断弾性率および損失せん断弾性率の関係とアスコンの疲労破壊回数との関係を検討する.

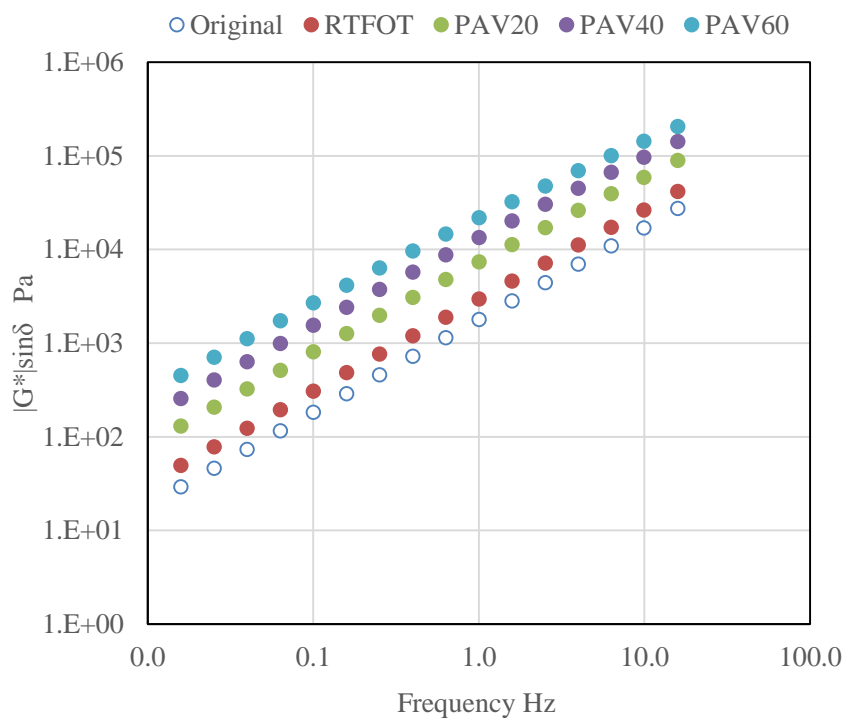


図-3.12 損失せん断と周波数の関係 (試験温度: 60°C)

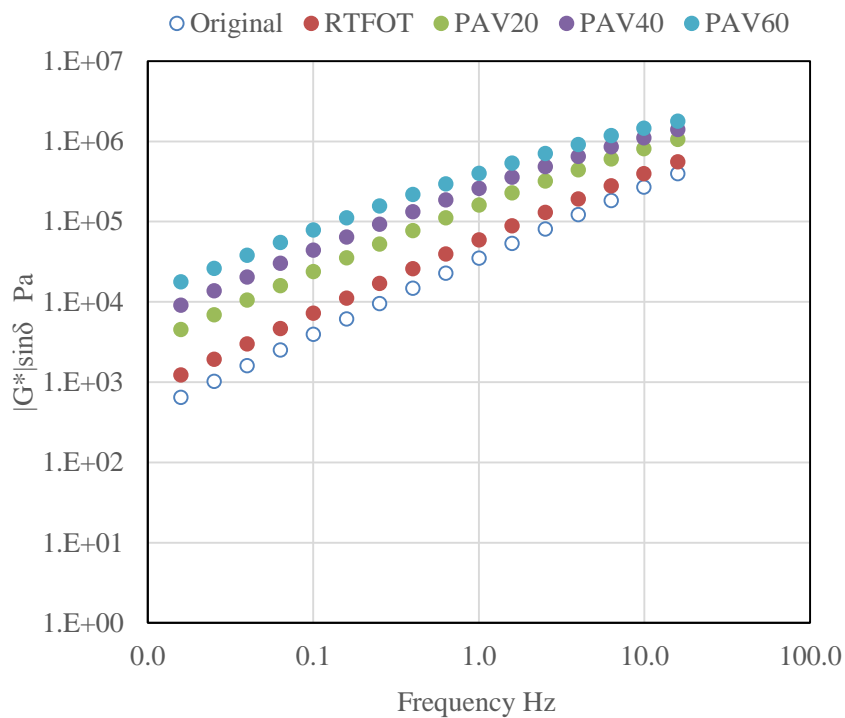


図-3.13 損失せん断と周波数の関係 (試験温度：40°C)

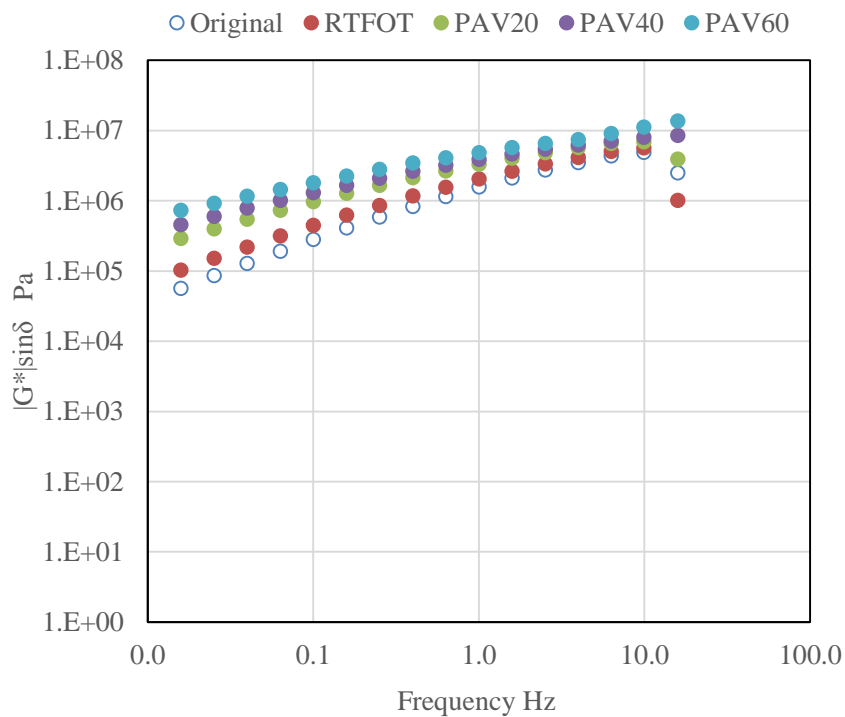


図-3.14 損失せん断と周波数の関係 (試験温度：20°C)

3. 6 第3章のまとめ

第3章より得られた知見を以下に示す。

- ・ 現場から得られた試料による性状試験と促進劣化させた試料による性状試験について検証したところ、バインダ単体の促進劣化試験では、高改質である改質 H 型のほうがストアスよりも針入度残留率が高い値であったが、混合物による促進劣化試験では、ストアスと改質 H 型の針入度残留率は同程度であった。このことは、実路での現象を再現しており、空隙率の高いポーラスではアスファルトが劣化しやすいと考えられる。
- ・ 室内試験の結果から、混合物の配合が同じであれば、改質混合物とストアス混合物を比較すると、改質混合物のほうが劣化進行は緩やかである。
- ・ アスファルトの劣化進行は混合物の配合により異なる。実際のアスファルト舗装における劣化状態をシミュレートするためには、使用する混合物配合を考慮する必要がある。
- ・ 室内試験により促進劣化させたアスファルトのスティフネスと DSR 試験から得られる複素せん断弾性率には、促進劣化時間、载荷時間あるいは試験温度に関わらず高い相関が見られた。また、測定温度が高くなるか、または载荷時間が長くなるに伴い各弾性率はそれぞれ低下するが、複素せん断弾性率や損失せん断弾性率と比較して、貯蔵せん断弾性率の低下が最も大きい。さらに、促進劣化時間が長くなるに伴いアスファルトは弾性的性質が強くなるため、位相角は小さくなる傾向が見られた。
- ・ 室内試験により促進劣化させたアスファルトと供用劣化を受けたアスファルトのスティフネスは、载荷時間や試験温度に関わらず、同様な傾向を示す。このことから、促進劣化によりアスファルトの供用後のスティフネスを再現することは可能と考えられる。
- ・ 現場から得られた試料と促進劣化させた試料に関わらず、DSR 試験より得た複素せん断弾性率とノモグラフより得たアスファルトのスティフネスは非常に相関が高い。このことから、DSR 試験によりアスファルトのスティフネスを推定することは十分可能である。ただし、ノモグラフより得たスティフネスと DSR 試験より得た複素せん断弾性率

第3章 環境負荷を与えたアスファルトの粘弾性状の変化に関する研究

は1 : 1 とならない。これはノモグラフより推定するスティフネスは針入度や軟化点など静的試験により推定しているのに対し、DSR 試験は動的試験であることおよびノモグラフでは試験温度 2 点により推定しているのに対し、DSR 試験では各温度で測定していることから値に違いが生じるものと考えられる。

- DSR 試験により得られる複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係は、測定温度、載荷時間、促進劣化させた試料と現場から得た試料、アスファルトの種類に関わらず、両対数軸上で直線関係にあることが明らかとなった。

第3章の参考文献

- [1] 佐々木巖：ストレートアスファルトの劣化性状と品質指標に関する調査，舗装， pp.9 - 15， 2008.4
- [2] 建設省土木研究所：SHRP アスファルト試験操作の手引き，土木技術資料第 3257 号， 1994.
- [3] 新田弘之：SHRP バインダ試験の測定原理と背景，アスファルト， Vol.39-190， pp.3-9， 1997.
- [4] S.A.Tabatabaei：EVALUATE AGING EFFECT OF SBS MODIFIED BITUMEN， World Academy of Science Engineering and Technology， pp.261-264， 2013.
- [5] 前原弘宣，高橋修，大久保美里：ポリマー改質アスファルトを用いた混合物の劣化および疲労特性，土木学会舗装工学論文集， Vol.11， pp.163-170， 2006.
- [6] 前原弘宣：劣化したアスファルト混合物の疲労特性に関する研究，博士論文，長岡技術科学大学， 2008.
- [7] 久保和幸，加納孝志，川上篤史：劣化アスファルト舗装の再生利用に関する研究(1)，土木研究所成果報告書 平成 21 年度， 2009.
- [8] 西崎到，新田弘之，佐々木巖：劣化アスファルト舗装の再生利用に関する研究(2)，土木研究所成果報告書 平成 21 年度， 2009.
- [9] 新田弘之，佐々木巖，西崎到，川上篤史，久保和幸：アスファルト・コンクリート塊の持続的なリサイクル，土木技術資料， Vol.53， No.4， pp.14-17， 2011.
- [10] D. A. Anderson and T. W. Kennedy：Development of SHRP binder Specification， Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists， Vol.62， pp.481 - 507， 1993.
- [11] Asphalt Institute：SUPERPAVE Asphalt Binder Specification， P26， 1998.3.
- [12] H. U. Bahia， D.I. Hanson， M. Zeng， H. Zhai， M. A. Khatri and R. M. Anderson：

第3章 環境負荷を与えたアスファルトの粘弾性状の変化に関する研究

Characterization of Modified asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report 459, 2001.

- [1 3] H. U. Bahia, H. Zhai, M. Zeng, Hu Yuling and P. Turner : Development of Binder Specification Parameters Based on Characterization of Damage Behavior, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.70, pp.97-137, 2005.

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容
49 kN 換算輪数とアスコンの疲労ひび割れに関する研究

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49kN 換算輪数とアスコンの疲労ひび割れに関する研究

4. 1 緒 言

アスファルト舗装の理論設計法では、アスコンのスティフネスにより許容 49kN 換算輪数を算出している [1]。アスコンのスティフネスは供用されることにより変化していると考えられるが、その性状変化も含めて解析されている。初期の材料特性によりアスファルト舗装の寿命が予測できれば、効率的にアスファルト舗装は補修計画を立てることが可能になる。さらに、新たな舗装材料を開発するうえでの指標となり、費用対効果の検証が可能となる。

我が国でのアスファルト舗装の設計方法は T_A 法が広く使用されていることから、弾性係数などのアスファルト混合物の固さ特性を設計に取り入れられることはほとんどない。しかし、海外では理論設計法が積極的に取り入れられており、様々な試験方法が提案されている [2] [3] [4] [5] [6] [7]。

第4章では、第2章で算出したアスファルトのスティフネスと混合物の品質試験から得られた各混合物のパラメータを用いてアスコンのスティフネスを推定し、さらにアスファルト舗装の許容 49kN 換算輪数を舗装設計便覧に記載される式、Asphalt Institute (AI) で提案されている式および Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (以下、MEPDG) により提案されている式から許容 49kN 換算輪数を算出した。MEPDG では、底面のひび割れと表面のひび割れの両モードの疲労ひび割れに対応した式を提案しており、ここでは底面のひび割れを対象とした式を用いることとした。

アスファルトのスティフネスからアスコンのスティフネスを推定する式は、1954年に Van Der Poel によって発表されたノモグラフが最初であり、その後様々な試験法が考案されている [10] [11] [12] [13]。特に、MEPDG では、アスファルトの粘度、混合物の粒度、容積特性から (4.1) 式を用いてアスコンの動弾性係数を推定している [9]。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

$$\log E = -1.249937 + 0.02932_{200} - 0.001767 (p_{200})^2 - 0.002841 \cdot p_4 - 0.0058097 \cdot V_a - 0.802208 \cdot \left(\frac{Vb_{eff}}{Vb_{eff} + Va} \right) + \left(\frac{3.871977 - 0.0021 \cdot p_4 + 0.003958 \cdot p_{38} - 0.000017 (p_{38})^2 + 0.005470 \cdot p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}} \right) \quad (4.1)$$

E^*	: 動的弾性率	(10^5 psi)
H	: アスファルトの粘度	(10^6 Poise)
F	: 周波数	(Hz)
Va	: 空隙率	(%)
Vb_{eff}	: 有効バインダ量	(体積%)
p_{34}	: 3/4インチ (19mm) ふるい残留質量	(%)
p_{38}	: 3/8インチ (9.5mm) ふるい残留質量	(%)
p_4	: No.4 (4.75mm) ふるい残留質量	(%)
p_{200}	: No.200 (0.075mm) ふるい残留質量	(%)

SHELL の Bitumen Handbook では、アスファルトからアスコンのスティフネスを推定する際に、アスファルト混合物の容積、骨材粒度などから予測している [14].

我が国において、アスコンのスティフネスの推定方法に定まった方法はない。そこで、舗装設計便覧に記される許容 49 kN 換算輪数をアスファルトのスティフネスより算出し、その適用性を検証することを目的とし、本研究では、Van del Poel のノモグラフおよび DSR 試験より得られたスティフネスから許容 49kN 換算輪数を推定することとした。さらに、AI 式および MEPDG 式についても同条件で比較することとした。

許容 49 kN 換算輪数を算出する際に、アスコンの最下層となるアスファルト安定処理用混合物のスティフネスを用いた。また、温度は 20°C とし、載荷時間については、0.1 Hz, 1 Hz, 10 Hz で算出した。さらに、実路より採取したアスコン底面の写真 [15] と許容 49 kN 換算輪数との相関について考察した。

4. 2 解析方法

(1) アスコンのスティフネスの推定方法

Heukelom は、アスファルトのスティフネス S_{bit} からアスコンのスティフネス S_{mix} を推定する (4.2) 式を提案している [16]. Van del Poel のノモグラフより推定したアスファルトのスティフネス [17] と DSR 試験より得られた複素せん断弾性率を用いてアスコンの弾性係数を推定した. この時のアスコンの空隙率や飽和度は, 第 2 章で得られた採取した供試体の測定結果を用いた. アスファルトの密度は 1.03 g/cm^3 とした.

$$\frac{S_{mix}}{S_{bit}} = \left(1 + \frac{2.5}{n} \cdot \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n \quad (4.2)$$

$$n = 0.83 \log \frac{4 \times 10^4}{S_{bit}} \quad (4.3)$$

$$C_v = \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad (4.4)$$

S_{mix}	: アスコンのスティフネス	(MPa)
S_{bit}	: アスファルトのスティフネス	(MPa)
C_v	: アスコンの骨材容積係数	(%)
V_A	: 骨材の容積率	(%)
V_B	: バインダの容積率	(%)

ただし, アスコンの空隙率が3%以上では C_v を次のように修正した. ポーラス混合物についても (4.5) 式により算出した.

$$C_v = \frac{1}{0.97 + 0.01 \cdot \{100 - (V_A + V_B)\}} \times \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad (4.5)$$

(2) アスファルト舗装の許容 49kN 換算輪数の算出方法

アスコンの許容 49 kN 換算輪数は、舗装設計便覧に示された手法 (4.6) 式, Asphalt Institute (AI) の破壊規準式 (4.9) 式および MEPDG の (4.10) 式を用いて比較した。許容 49 kN 換算輪数は、各工区の条件をそろえるため車輪通行位置におけるアスファルト安定処理のスティフネスを用いて算出した。

- ・ 舗装設計便覧に示された手法

$$N_{fa} = \beta_{a1} \cdot C \cdot 6.167 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3.291\beta_{a2}} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{0.854\beta_{a3}} \quad (4.6)$$

N_{fa} : 許容49 kN換算輪数

C : アスコン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

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \cdot \left(\frac{VFA}{100} - 0.69\right) \quad (4.7)$$

VFA : 混合物配合の飽和度 (%)

ϵ : 曲げ疲労試験時のひずみ ($\times 10^{-6}$)

E : アスコンの最下層に使用する混合物の弾性係数 (MPa)

$\beta_{a1}, \beta_{a2}, \beta_{a3}$: 我が国の経験によるAI破壊規準に対する補正係数

β_{a1} : $K_a \times \beta_{a1}'$

β_{a1}' : 5.229×10^4

$$K_a = \frac{1}{8.27 \times 10^{-11} + 7.83 \cdot e^{-0.11H_a}} \quad (4.8)$$

(アスコン層の厚さが18 cm以上の場合は1.0とした.)

H_a : アスコン層の厚さ (cm)

β_{a2} : 1.314

β_{a3} : 3.018

- AIの破壊基準式

$$N_{fa} = 0.00113 \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3.291} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{0.854} \quad (4.9)$$

N_{fa} : AI (アメリカアスファルト協会) の許容49kN換算輪数

- MEPDGにおける底面ひび割れの式

$$N_{fa} = 0.00432 \cdot k'_1 \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3.9492} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281} \quad (4.10)$$

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{e^{11.02 - 3.49H_a}}} \quad (4.11)$$

4. 3 評価結果

(1) アスコンのスティフネスの推定結果

ノモグラフより算出したアスファルトのスティフネスと DSR 試験より得られた複素せん断弾性率よりアスコンのスティフネスを推定した。

図-4.1 に、ノモグラフから求めたアスファルトのスティフネスと DSR 試験より得られた複素せん断弾性率により算出したスティフネスの関係を、図-4.2 にそれらの値から推定したアスコンのスティフネスを示す。

図-2.17 と同様に、周波数が高いあるいは測定温度が低くなるに従い、アスファルトのスティフネスは高くなる。改質 H 型については、ストアスのスティフネスと比較して、特に高温あるいは低速条件で高い値を示している。

アスコンのスティフネスを見ると、バインダのスティフネスと同様に低温あるいは高速になるほど高い値となる。バインダのスティフネスと比較し、ポーラス混合物のスティフネスと連続粒度の混合物のスティフネスはほぼ同程度となった。ポーラス混合物では、容積補正するための閾値である空隙率 3% よりも著しく高いため、容積補正せずに算出した結果を図-4.3 に示す。容積補正せずに算出したポーラス混合物のスティフネスは、連続粒度の混合物とほぼ同程度のスティフネスとなり、高温あるいは低速側のスティフネスが高い値となった。本試験結果については、今後混合物のスティフネスを測定し空隙率の補正に対する適用性について調査する必要がある。

図-4.4~4.7 には各工区の表層から安定処理層に使用されていた混合物について、周波数と温度別にスティフネスの変化を示す。

図中の黒色の線は、舗装設計便覧に示される一般的なアスコンの弾性係数を示す。バインダのスティフネスからアスコンのスティフネスを解析した結果、周波数あるいは温度によってアスコンの推定スティフネスは大きく異なる。ここでは周波数を 0.1Hz, 1.0Hz, 10Hz で測定しているが、連続粒度の表層や基層では、この条件で一般的なアスコンにおける弾性

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と アスコンの疲労ひび割れに関する研究

係数の範囲と概ね一致していた。ポーラス混合物では S_{bit} および複素せん断弾性率から求めたスティフネスは低く、ともに一般的なアスコンにおける弾性係数の範囲の下限側で推移している。アスファルト安定処理混合物のスティフネスは、 S_{bit} と複素せん断弾性率で異なり、 S_{bit} から推定したアスコンのスティフネスよりも複素せん断弾性率から推定したアスコンのスティフネスのほうが高い値を示した。

本研究では、アスファルトの粘弾性状とアスファルト混合物の疲労ひび割れの関係を検証することを目的としており、アスコンのスティフネスについて実測値と推定値の検証を行っていないため、これらの検証は今後の課題とする。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

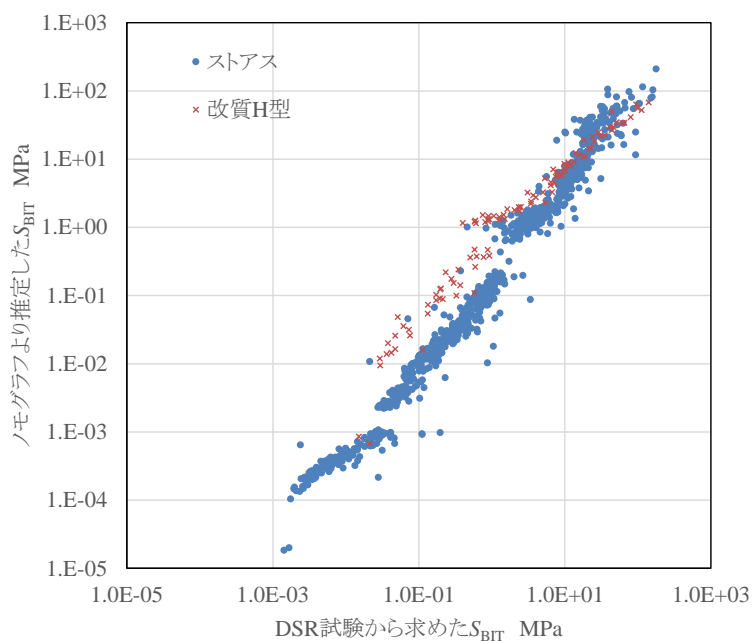


図-4.1 ノモグラフから得たアスファルトのスティフネスと

DSR 試験から算出したアスファルトの複素せん断弾性率の関係

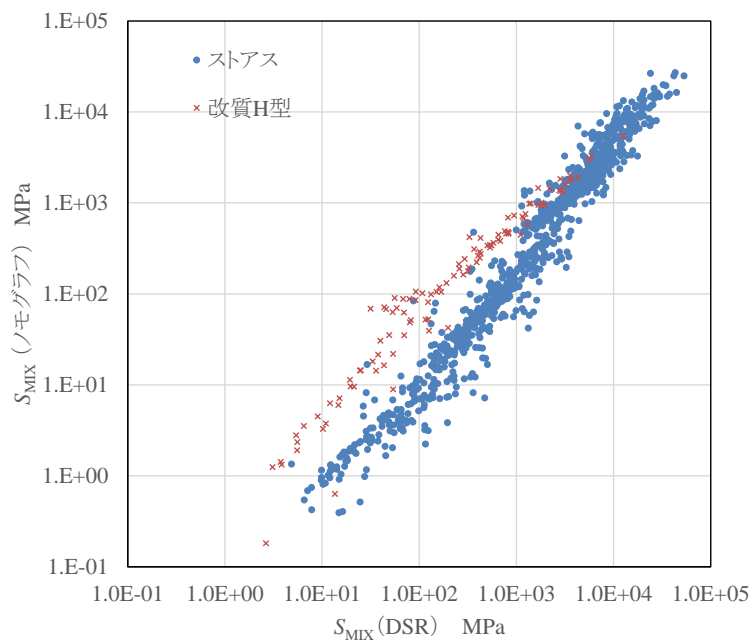


図-4.2 ノモグラフより求めたアスコンのスティフネスと複素せん断弾性率より
求めたアスコンのスティフネスの関係 (ポーラスの骨材容積率を補正)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容49 kN換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

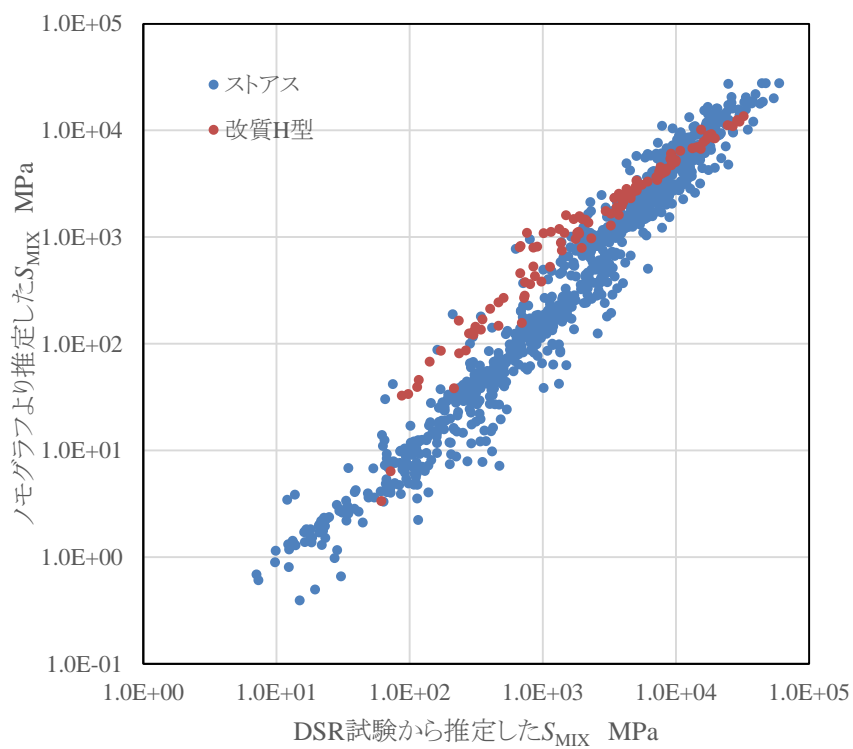


図-4.3 ノモグラフより求めたアスコンのスティフネスと複素せん断弾性率より
求めたアスコンのスティフネスの関係 (ポーラスの骨材容積率の補正なし)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容49kN換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

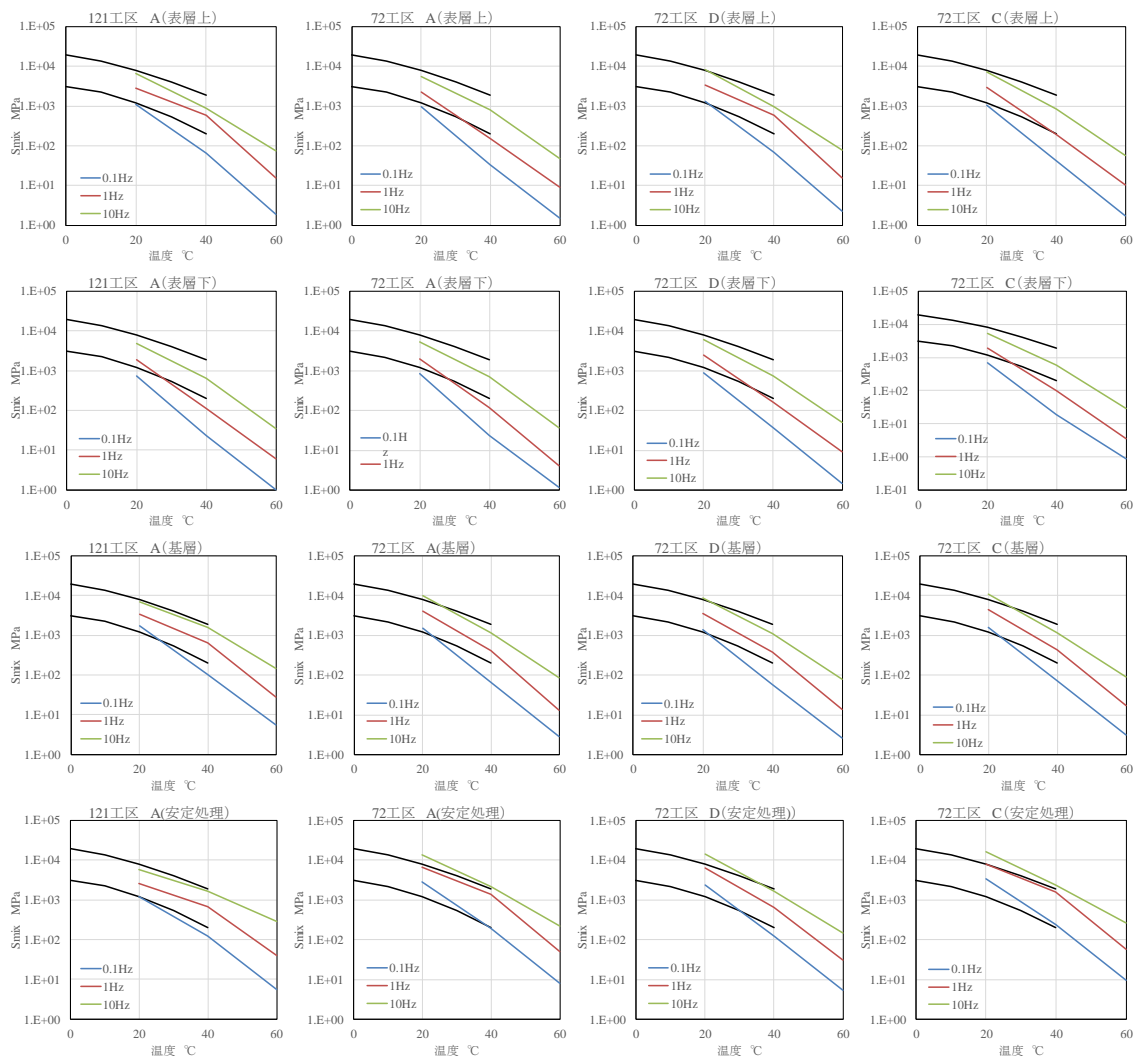


図-4.4 ノモグラフより推定したアスコンのスティフネス (121区工, 72工区)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と アスコンの疲労ひび割れに関する研究

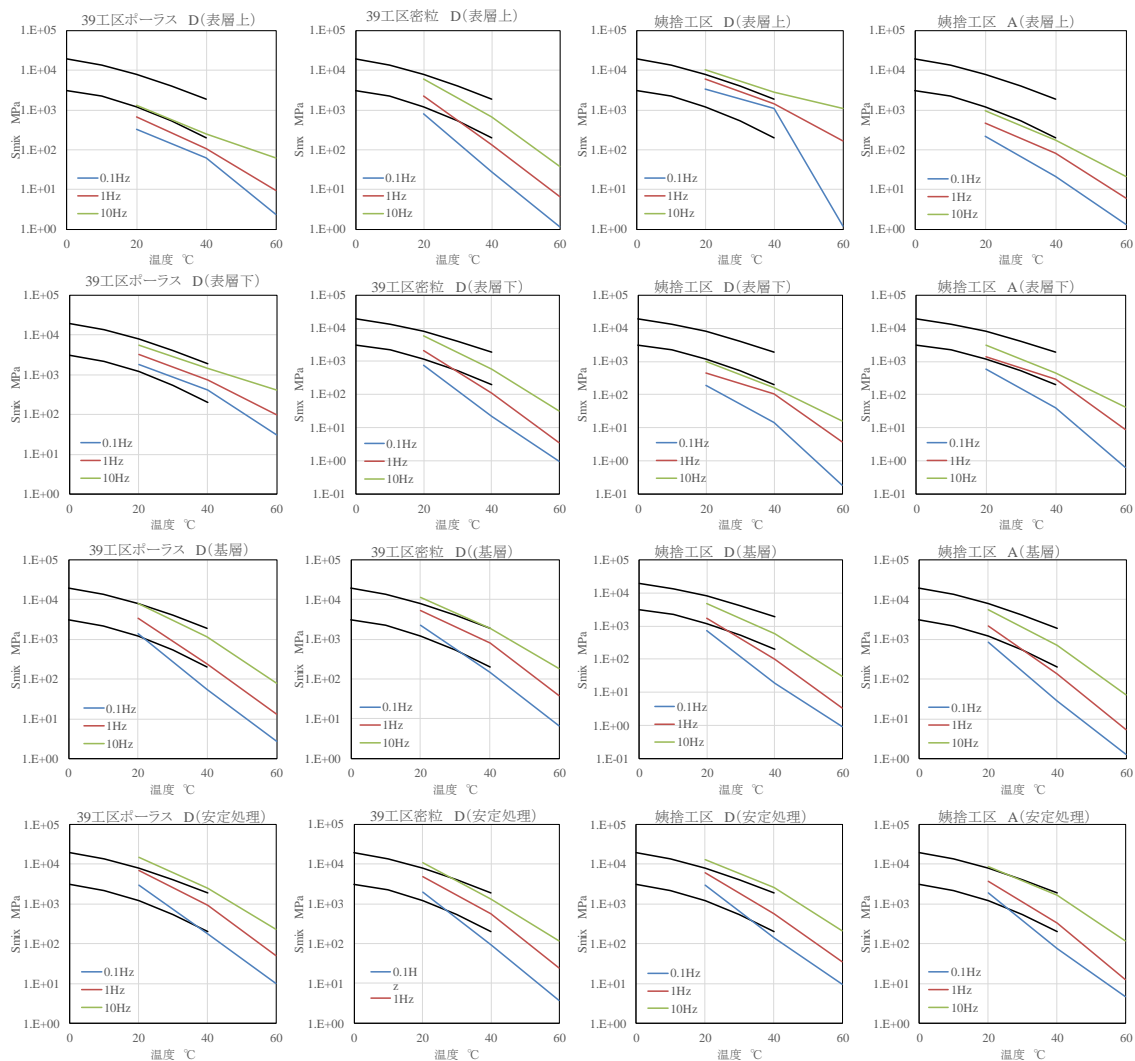


図-4.5 ノモグラフより推定したアスコンのスティフネス (39区工, 姨捨工区)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容49 kN換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

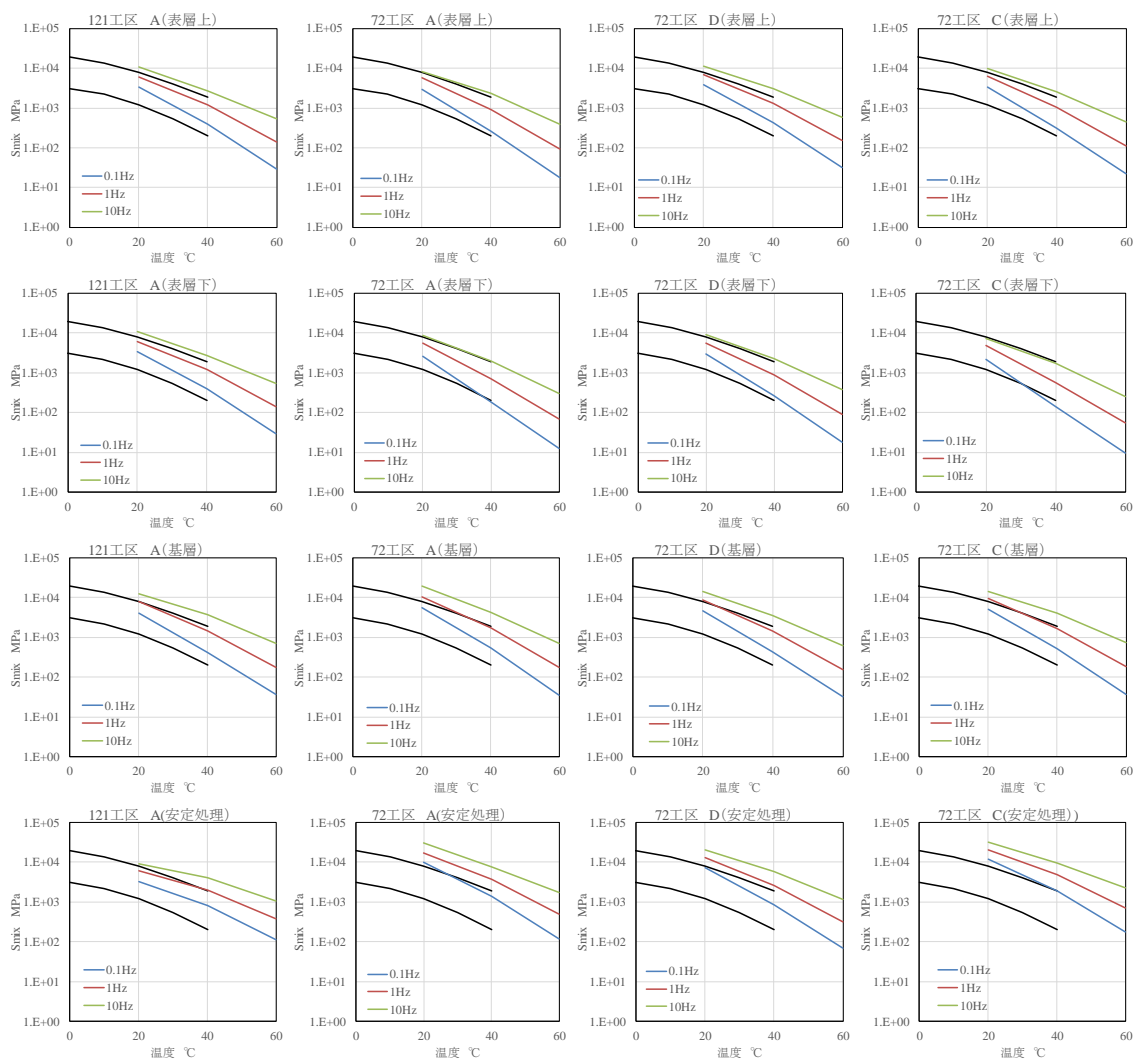


図-4.6 複素せん断弾性率より推定したアスコンのスティフネス (121区工, 72区工)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と アスコンの疲労ひび割れに関する研究

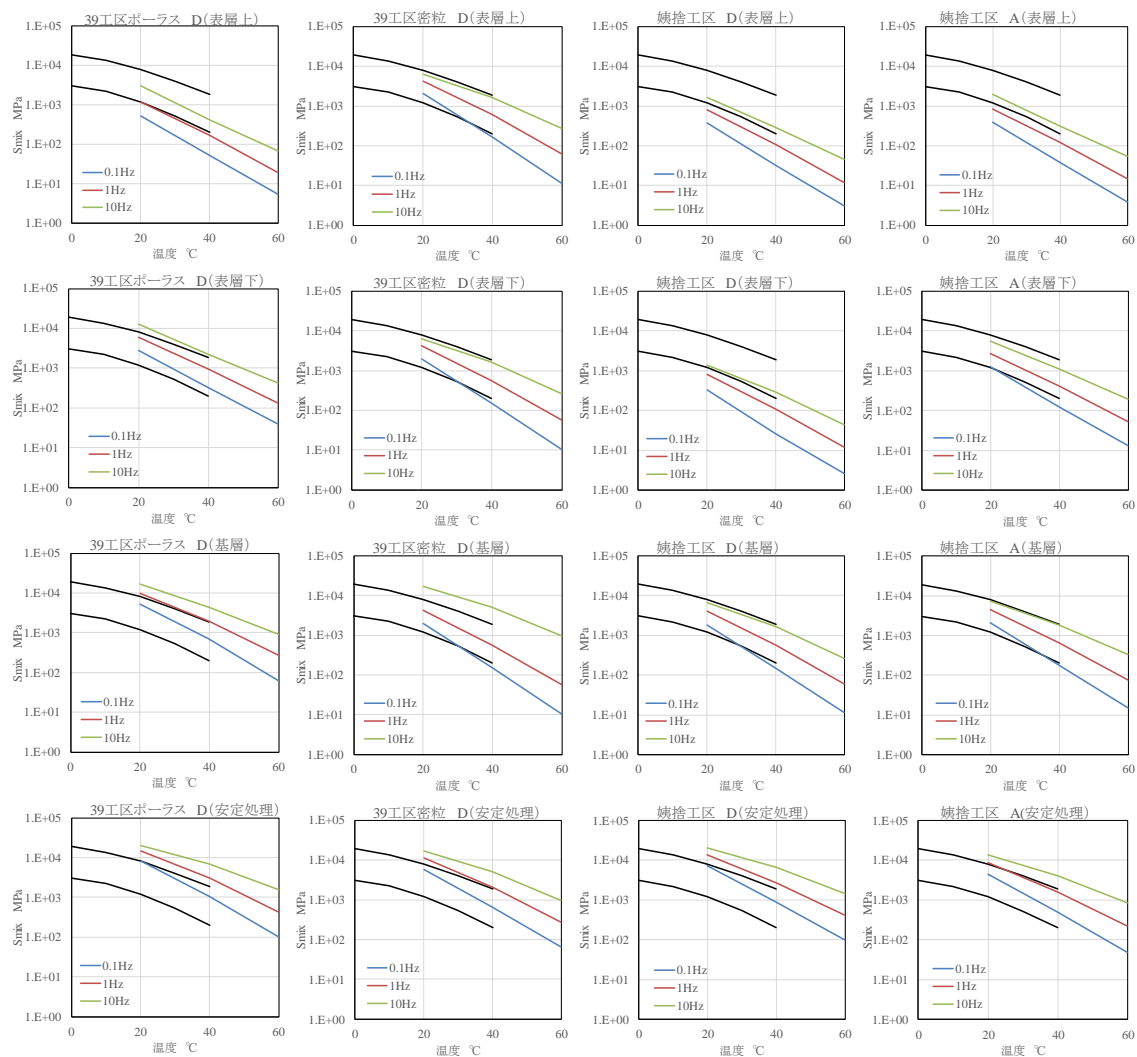


図-4.7 複素せん断弾性率より推定したアスコンのスティフネス (39 区工, 姨捨工区)

(2) 許容 49kN 換算輪数の算出結果

上記で推定したアスファルト安定処理混合物のスティフネスを用いて、許容 49 kN 換算輪数を算出した。表-4.1 に計算に用いた試験条件およびその結果、図-4.8 に各工区における安定処理混合物のスティフネス、図-4.9 に各工区の安定処理混合物の空隙率と飽和度、図-4.10 に各工区のアスファルト舗装の厚さを示す。計算に用いるひずみは 200 μ 、400 μ および 600 μ としているが、本研究がひび割れ現象と許容 49 kN 換算輪数との相関を把握することを目的としているため、これ以降では 200 μ の値で比較検証している。

図-4.11 から 4.13 に試験温度 20°C、载荷速度 10 Hz、ひずみは 200 μ として解析した許容 49 kN 換算輪数、図-4.14 に DSR 試験の結果を用いて推定した各破壊基準式による許容 49 kN 換算輪数を示す。さらに、この許容 49 kN 換算輪数と比較検証するため、写真-4.1 から 4.4 に、アスコン層底部のひび割れ状況を示す。

ここで示す通り、アスコン底面にはほとんどの工区でひび割れが生じていた。ひび割れがほとんど見られなかったのは 121 工区 (No.2) であり、次に少ないのが姨捨工区 (No.13) であった。

日本道路協会から出版されている舗装設計便覧で示される式を用いて許容 49 kN 換算輪数を算出した結果、アスファルトの性状試験から推定した S_{bi} と DSR 試験から求めた複素せん断弾性率を用いて推定した許容 49 kN 換算輪数は、その絶対値は異なるが、同様な傾向が見られた。複素せん断弾性率より求めた安定処理混合物のスティフネスは全体的に高い値であったため、許容 49 kN 換算輪数は小さい値であった。

AI で提案されている式を用いて許容 49 kN 換算輪数を算出した結果、舗装設計便覧で示される式とは傾向が大きく異なるものであった。これは、舗装設計便覧と比較し、アスコンの飽和度に大きく影響を受けるようである。

MEPDG では、全体的に許容 49 kN 換算輪数が高い値であり、一部で舗装設計便覧と同様な傾向を示していたが、ひび割れ箇所との明確な相関は見られなかった。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と アスコンの疲労ひび割れに関する研究

開削されたアスコンの底面にて生じているひび割れ箇所と許容 49 kN 換算輪数を算出した結果、舗装設計便覧で示される式により算出した許容 49 kN 換算輪数が高い数値となったのは、底面でひび割れが見られなかった 121 工区 (No.2) と比較的ひび割れの少なかった 姨捨工区 (No.13) であった。このことからアスコン層底部で生じているひび割れの大小と許容 49 kN 換算輪数が高かった箇所が概ね一致している結果であった。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容49kN換算輪数と
 アスコンの疲労ひび割れに関する研究

表-4.1 許容49kN換算輪数の解析結果

工区		121工区	72工区			39工区		姥捨工区				
表層混合物の種類		No.2	No.3	No.4	No.5	No.7	No.11	No.13	No.14			
舗装表面の状態		密粒	密粒	密粒	密粒	ポーラス	密粒	ポーラス	ポーラス			
舗装表面の状態		A	A	D	C	D	D	A	D			
アスファルト量	%	3.64	3.73	3.79	3.66	3.79	3.91	3.89	3.66			
密度	g/cm ³	2.517	2.470	2.454	2.466	2.413	2.391	2.396	2.429			
空隙率	%	5.7	4.0	4.0	3.9	3.6	4.4	3.9	3.1			
アスファルト密度	g/cm ³	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03			
アスファルト容積	%	8.9	8.9	9.0	8.8	8.9	9.1	9.0	8.6			
骨材空隙率(VMA)	%	14.6	12.9	13.0	12.7	12.5	13.5	12.95	11.73			
飽和度(VFA)	%	60.8	69.1	69.3	69.2	71.2	67.4	69.9	73.6			
層厚	cm	27.7	17.6	17.6	17.6	22.0	23.1	23.7	20.3			
舗装設計便覧	Ka(18cm以上は1.0)	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0			
	補正係数	βa1	52290	46286	46286	46286	52290	52290	52290			
		βa2	1.314	1.314	1.314	1.314	1.314	1.314	1.314			
		βa3	3.018	3.018	3.018	3.018	3.018	3.018	3.018			
M		-0.40	0.00	0.01	0.01	0.10	-0.08	0.04	0.22			
C		0.40	1.01	1.03	1.02	1.27	0.83	1.10	1.67			
MEPDG	k'l	250	250	250	250	250	250	250	250			
安定処理混合物のスティフネス	S mix ノモグラフ (MPa)	20	0.1Hz	1215	2774	2334	3373	2885	1937	1850	2917	
		20	1Hz	2625	6577	6217	7848	6928	4882	3760	5967	
		20	10Hz	5719	13632	13915	15963	14822	10923	8497	12977	
	S mix 3×G [#] (MPa)	20	0.1Hz	3255	9850	7147	11552	8039	6132	4431	7125	
		20	1Hz	6086	16926	12657	19813	14657	10668	8831	13727	
		20	10Hz	9017	29710	20484	31076	20259	14996	13282	20198	
舗装設計便覧 許容49kN 換算輪数 ノモグラフ (輪数)	200	μ	0.1Hz	1.4.E+08	3.8.E+07	6.1.E+07	2.3.E+07	4.9.E+07	9.0.E+07	1.3.E+08	6.2.E+07	
			1Hz	2.0.E+07	4.1.E+06	4.9.E+06	2.6.E+06	5.1.E+06	8.3.E+06	2.1.E+07	9.9.E+06	
			10Hz	2.7.E+06	6.3.E+05	6.1.E+05	4.2.E+05	7.2.E+05	1.0.E+06	2.6.E+06	1.3.E+06	
	400	μ	0.1Hz	7.2.E+06	1.9.E+06	3.0.E+06	1.2.E+06	2.4.E+06	4.5.E+06	6.7.E+06	3.1.E+06	
			1Hz	9.9.E+05	2.1.E+05	2.4.E+05	1.3.E+05	2.6.E+05	4.1.E+05	1.1.E+06	4.9.E+05	
			10Hz	1.3.E+05	3.1.E+04	3.1.E+04	2.1.E+04	3.6.E+04	5.2.E+04	1.3.E+05	6.6.E+04	
	600	μ	0.1Hz	1.2.E+06	3.3.E+05	5.3.E+05	2.0.E+05	4.2.E+05	7.7.E+05	1.2.E+06	5.4.E+05	
			1Hz	1.7.E+05	3.6.E+04	4.2.E+04	2.3.E+04	4.4.E+04	7.1.E+04	1.9.E+05	8.5.E+04	
			10Hz	2.3.E+04	5.5.E+03	5.3.E+03	3.7.E+03	6.2.E+03	9.0.E+03	2.3.E+04	1.2.E+04	
	舗装設計便覧 許容49kN 換算輪数 DSR (輪数)	200	μ	0.1Hz	1.1.E+07	1.5.E+06	3.4.E+06	9.8.E+05	3.5.E+06	4.6.E+06	1.4.E+07	6.2.E+06
				1Hz	2.3.E+06	3.6.E+05	7.8.E+05	2.4.E+05	7.4.E+05	1.1.E+06	2.4.E+06	1.2.E+06
				10Hz	8.2.E+05	8.5.E+04	2.3.E+05	7.6.E+04	3.2.E+05	4.6.E+05	8.3.E+05	4.3.E+05
400		μ	0.1Hz	5.7.E+05	7.3.E+04	1.7.E+05	4.9.E+04	1.7.E+05	2.3.E+05	7.0.E+05	3.1.E+05	
			1Hz	1.1.E+05	1.8.E+04	3.9.E+04	1.2.E+04	3.7.E+04	5.5.E+04	1.2.E+05	5.8.E+04	
			10Hz	4.1.E+04	4.2.E+03	1.1.E+04	3.8.E+03	1.6.E+04	2.3.E+04	4.1.E+04	2.1.E+04	
600		μ	0.1Hz	9.8.E+04	1.3.E+04	2.9.E+04	8.4.E+03	3.0.E+04	4.0.E+04	1.2.E+05	5.4.E+04	
			1Hz	2.0.E+04	3.1.E+03	6.8.E+03	2.1.E+03	6.4.E+03	9.5.E+03	2.1.E+04	1.0.E+04	
			10Hz	7.1.E+03	7.3.E+02	2.0.E+03	6.6.E+02	2.8.E+03	4.0.E+03	7.2.E+03	3.7.E+03	
AI 許容49kN 換算輪数 ノモグラフ (輪数)		200	μ	0.1Hz	1.6.E+06	2.0.E+06	2.3.E+06	1.7.E+06	2.4.E+06	2.2.E+06	3.0.E+06	3.1.E+06
				1Hz	8.1.E+05	9.3.E+05	1.0.E+06	8.1.E+05	1.1.E+06	9.9.E+05	1.6.E+06	1.7.E+06
				10Hz	4.2.E+05	5.0.E+05	5.0.E+05	4.4.E+05	5.9.E+05	5.0.E+05	8.2.E+05	8.6.E+05
	400	μ	0.1Hz	1.6.E+05	2.0.E+05	2.4.E+05	1.7.E+05	2.4.E+05	2.2.E+05	3.1.E+05	3.1.E+05	
			1Hz	8.3.E+04	9.5.E+04	1.0.E+05	8.3.E+04	1.1.E+05	1.0.E+05	1.7.E+05	1.7.E+05	
			10Hz	4.3.E+04	5.1.E+04	5.1.E+04	4.5.E+04	6.0.E+04	5.1.E+04	8.4.E+04	8.8.E+04	
	600	μ	0.1Hz	4.2.E+04	5.3.E+04	6.2.E+04	4.5.E+04	6.4.E+04	5.9.E+04	8.1.E+04	8.3.E+04	
			1Hz	2.2.E+04	2.5.E+04	2.7.E+04	2.2.E+04	3.0.E+04	2.7.E+04	4.4.E+04	4.5.E+04	
			10Hz	1.1.E+04	1.3.E+04	1.4.E+04	1.2.E+04	1.6.E+04	1.3.E+04	2.2.E+04	2.3.E+04	
	AI 許容49kN輪数 DSR (輪数)	200	μ	0.1Hz	6.8.E+05	6.6.E+05	8.9.E+05	5.8.E+05	9.9.E+05	8.2.E+05	1.4.E+06	1.4.E+06
				1Hz	4.0.E+05	4.2.E+05	5.5.E+05	3.7.E+05	5.9.E+05	5.1.E+05	7.9.E+05	8.2.E+05
				10Hz	2.8.E+05	2.6.E+05	3.6.E+05	2.5.E+05	4.5.E+05	3.8.E+05	5.6.E+05	5.9.E+05
400		μ	0.1Hz	6.9.E+04	6.8.E+04	9.1.E+04	6.0.E+04	1.0.E+05	8.3.E+04	1.5.E+05	1.5.E+05	
			1Hz	4.1.E+04	4.3.E+04	5.6.E+04	3.8.E+04	6.1.E+04	5.2.E+04	8.1.E+04	8.4.E+04	
			10Hz	2.9.E+04	2.6.E+04	3.7.E+04	2.6.E+04	4.6.E+04	3.9.E+04	5.7.E+04	6.0.E+04	
600		μ	0.1Hz	1.8.E+04	1.8.E+04	2.4.E+04	1.6.E+04	2.7.E+04	2.2.E+04	3.8.E+04	3.9.E+04	
			1Hz	1.1.E+04	1.1.E+04	1.5.E+04	9.9.E+03	1.6.E+04	1.4.E+04	2.1.E+04	2.2.E+04	
			10Hz	7.6.E+03	6.9.E+03	9.7.E+03	6.8.E+03	1.2.E+04	1.0.E+04	1.5.E+04	1.6.E+04	
MEPDG 許容49kN 換算輪数 ノモグラフ (輪数)		200	μ	0.1Hz	3.3.E+07	2.9.E+07	3.7.E+07	2.3.E+07	3.5.E+07	3.8.E+07	5.4.E+07	4.5.E+07
				1Hz	1.2.E+07	9.7.E+06	1.1.E+07	7.8.E+06	1.1.E+07	1.2.E+07	2.2.E+07	1.8.E+07
				10Hz	4.6.E+06	3.8.E+06	3.8.E+06	3.1.E+06	4.3.E+06	4.2.E+06	7.6.E+06	6.7.E+06
	400	μ	0.1Hz	2.2.E+06	1.9.E+06	2.4.E+06	1.5.E+06	2.3.E+06	2.5.E+06	3.5.E+06	2.9.E+06	
			1Hz	8.1.E+05	6.3.E+05	6.9.E+05	5.1.E+05	7.4.E+05	7.6.E+05	1.4.E+06	1.2.E+06	
			10Hz	3.0.E+05	2.5.E+05	2.5.E+05	2.0.E+05	2.8.E+05	2.7.E+05	4.9.E+05	4.3.E+05	
	600	μ	0.1Hz	4.4.E+05	3.8.E+05	4.9.E+05	3.0.E+05	4.6.E+05	5.0.E+05	7.0.E+05	5.9.E+05	
			1Hz	1.6.E+05	1.3.E+05	1.4.E+05	1.0.E+05	1.5.E+05	1.5.E+05	2.8.E+05	2.4.E+05	
			10Hz	6.0.E+04	5.0.E+04	5.0.E+04	4.1.E+04	5.6.E+04	5.4.E+04	9.9.E+04	8.7.E+04	
	MEPDG 許容49kN 換算輪数 DSR (輪数)	200	μ	0.1Hz	9.5.E+06	5.8.E+06	8.9.E+06	4.8.E+06	9.4.E+06	8.7.E+06	1.8.E+07	1.4.E+07
				1Hz	4.2.E+06	2.9.E+06	4.3.E+06	2.4.E+06	4.4.E+06	4.3.E+06	7.2.E+06	6.2.E+06
				10Hz	2.6.E+06	1.4.E+06	2.3.E+06	1.3.E+06	2.9.E+06	2.8.E+06	4.3.E+06	3.8.E+06
400		μ	0.1Hz	6.1.E+05	3.7.E+05	5.8.E+05	3.1.E+05	6.1.E+05	5.6.E+05	1.1.E+06	9.3.E+05	
			1Hz	2.8.E+05	1.9.E+05	2.8.E+05	1.5.E+05	2.8.E+05	2.8.E+05	4.7.E+05	4.0.E+05	
			10Hz	1.7.E+05	9.1.E+04	1.5.E+05	8.7.E+04	1.9.E+05	1.8.E+05	2.8.E+05	2.5.E+05	
600		μ	0.1Hz	1.2.E+05	7.5.E+04	1.2.E+05	6.2.E+04	1.2.E+05	1.1.E+05	2.3.E+05	1.9.E+05	
			1Hz	5.5.E+04	3.8.E+04	5.6.E+04	3.1.E+04	5.7.E+04	5.6.E+04	9.5.E+04	8.1.E+04	
			10Hz	3.4.E+04	1.8.E+04	3.0.E+04	1.7.E+04	3.8.E+04	3.6.E+04	5.6.E+04	4.9.E+04	

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

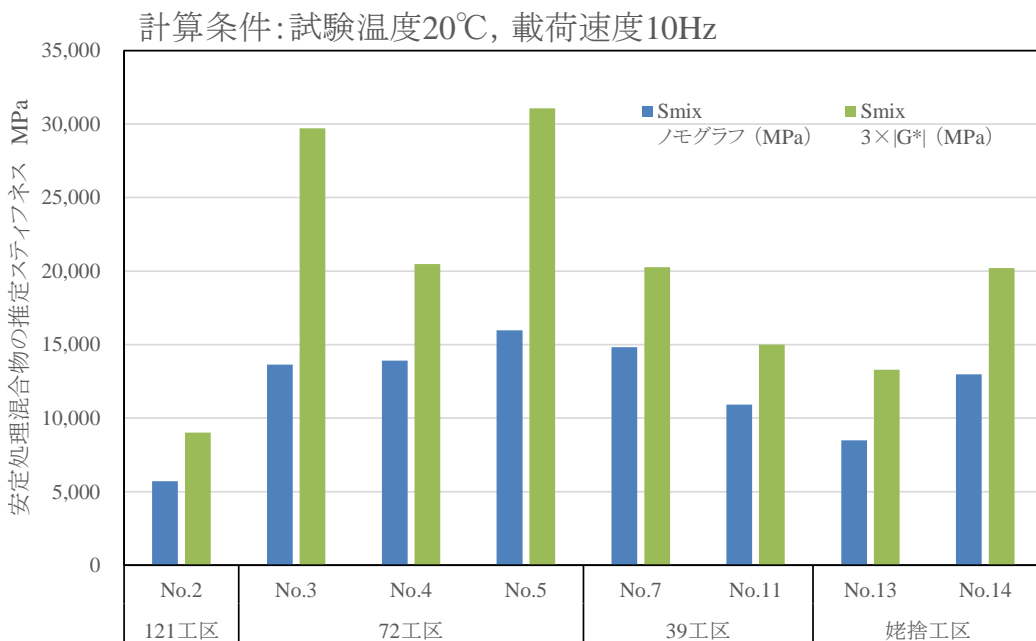


図-4.8 各工区における安定処理混合物の推定スティフネス

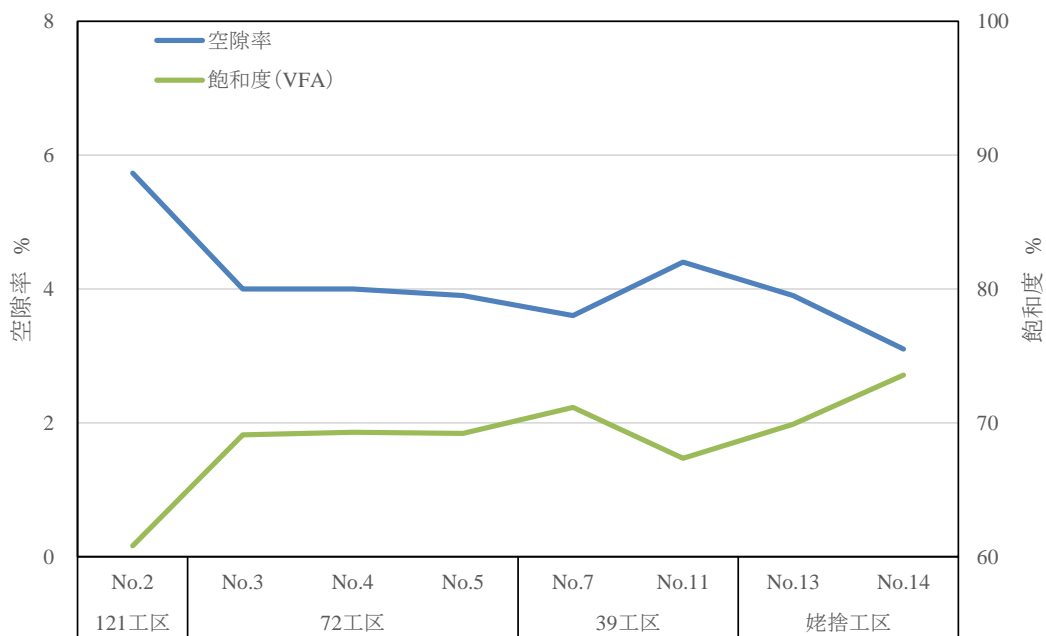


図-4.9 各工区における安定処理混合物の空隙率と飽和度

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

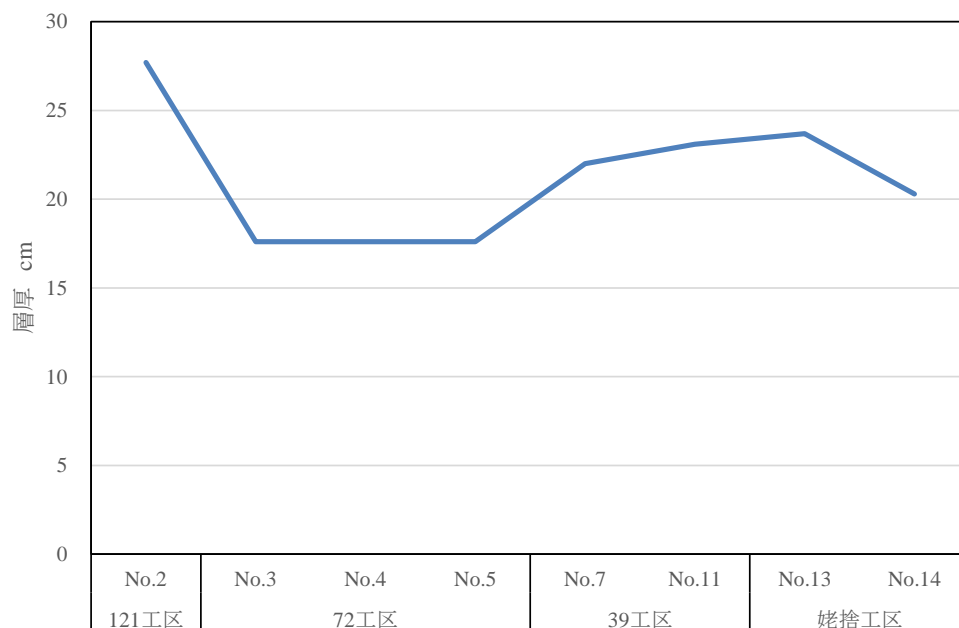


図-4.10 各工区におけるアスコンの層厚

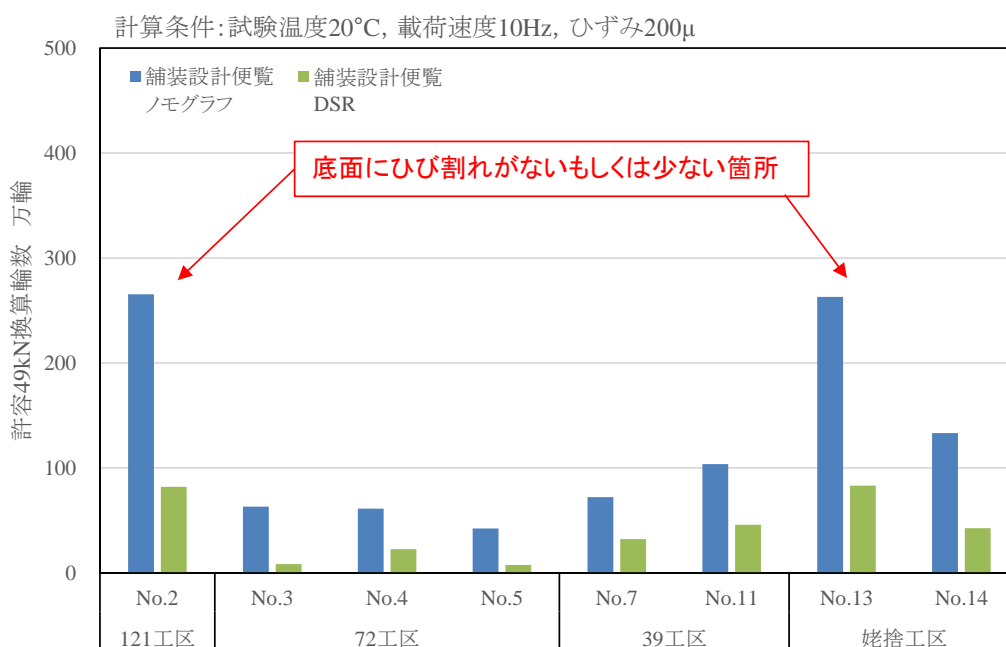


図-4.11 各工区の許容 49kN 換算輪数 (舗装設計便覧)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

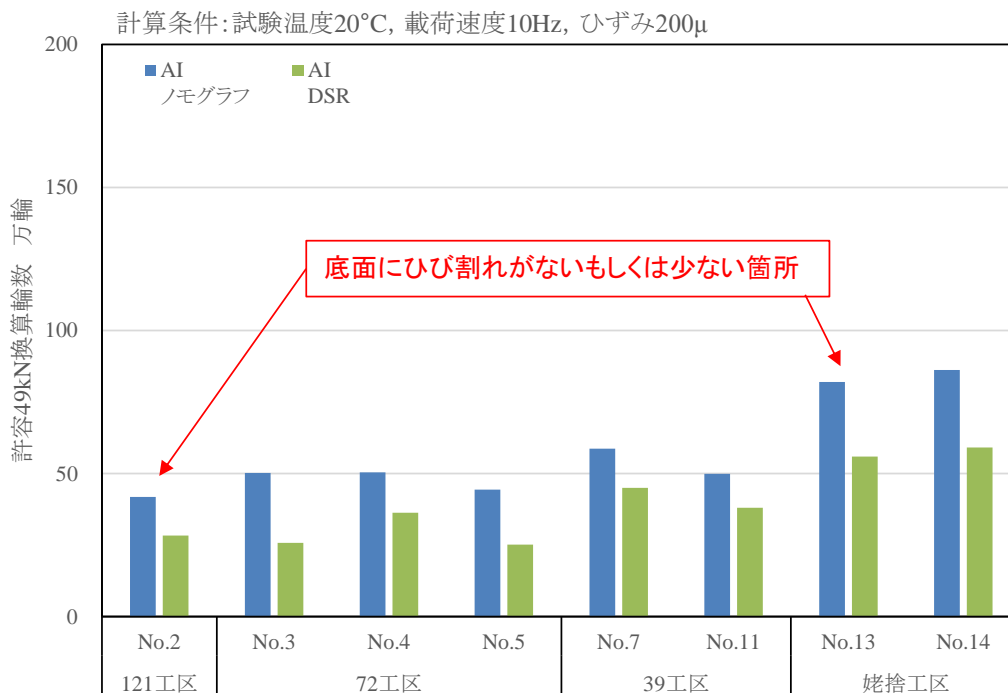


図-4.12 各工区の許容 49kN 換算輪数 (AI)

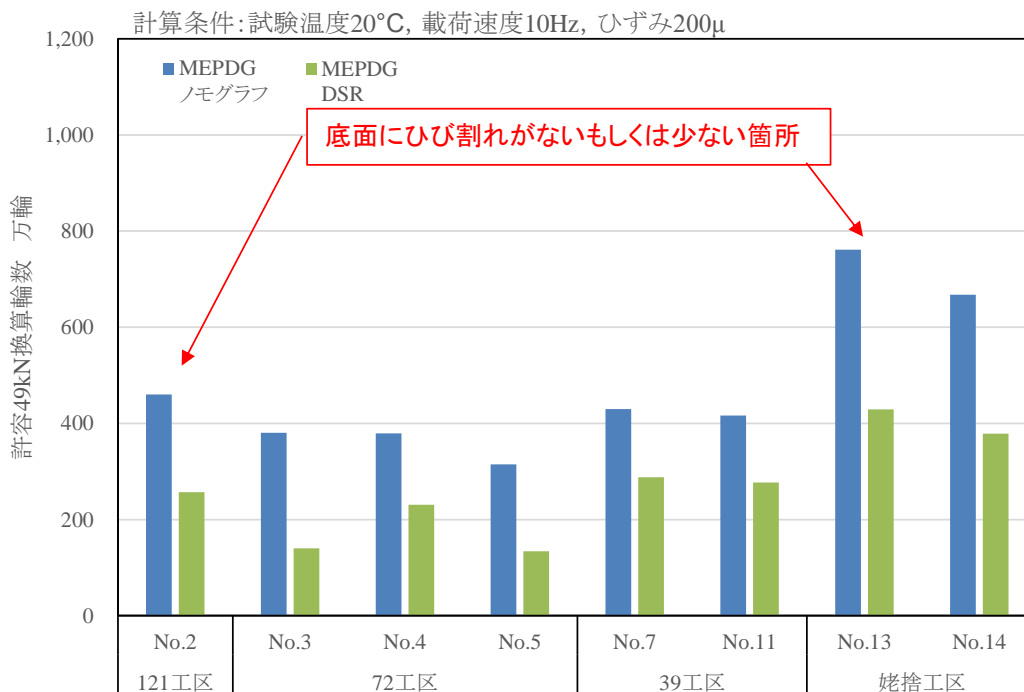


図-4.13 各工区の許容 49kN 換算輪数 (MEPDG)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

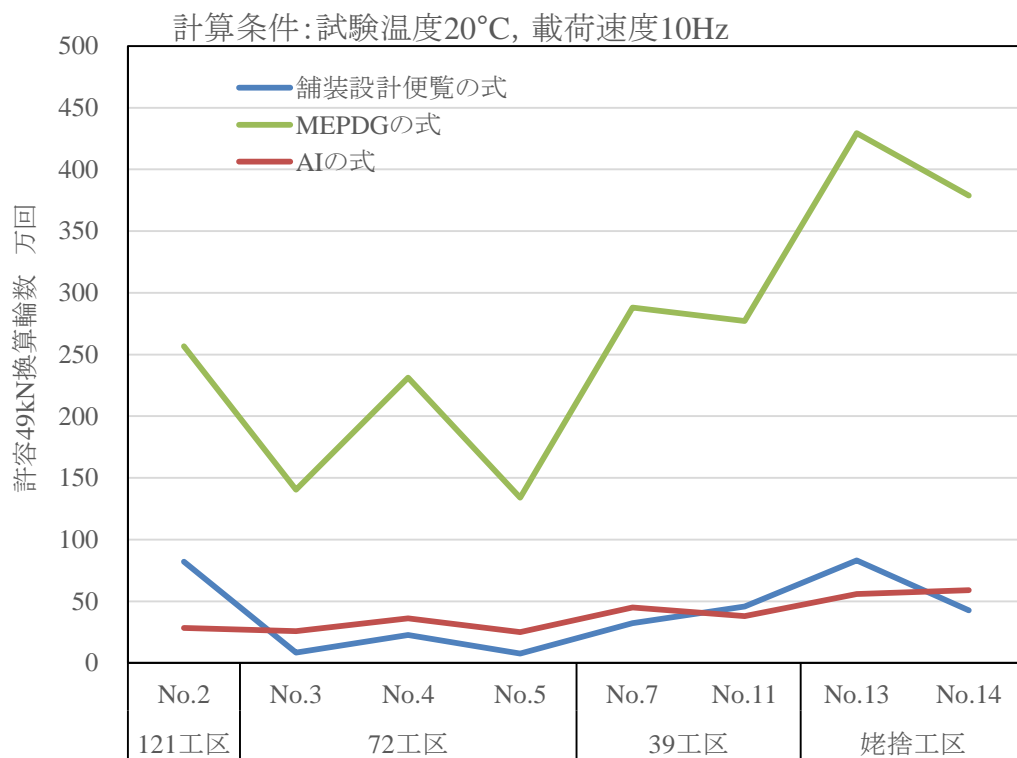


図-4.14 許容 49kN 換算輪数の比較

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

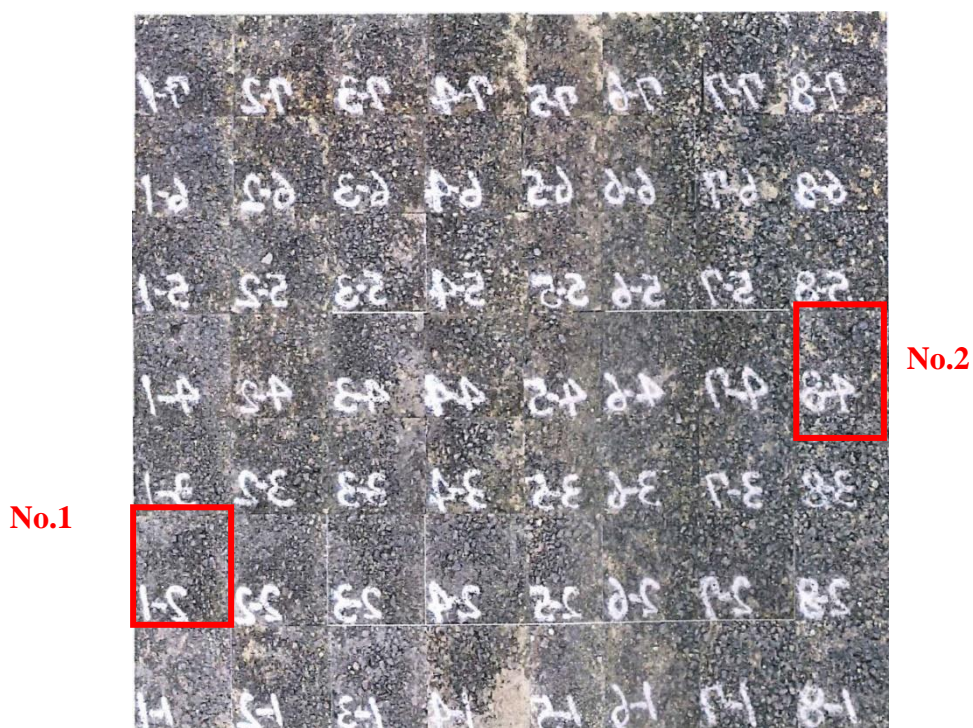


写真-4.1 アスコン層底部の写真 (121 工区)

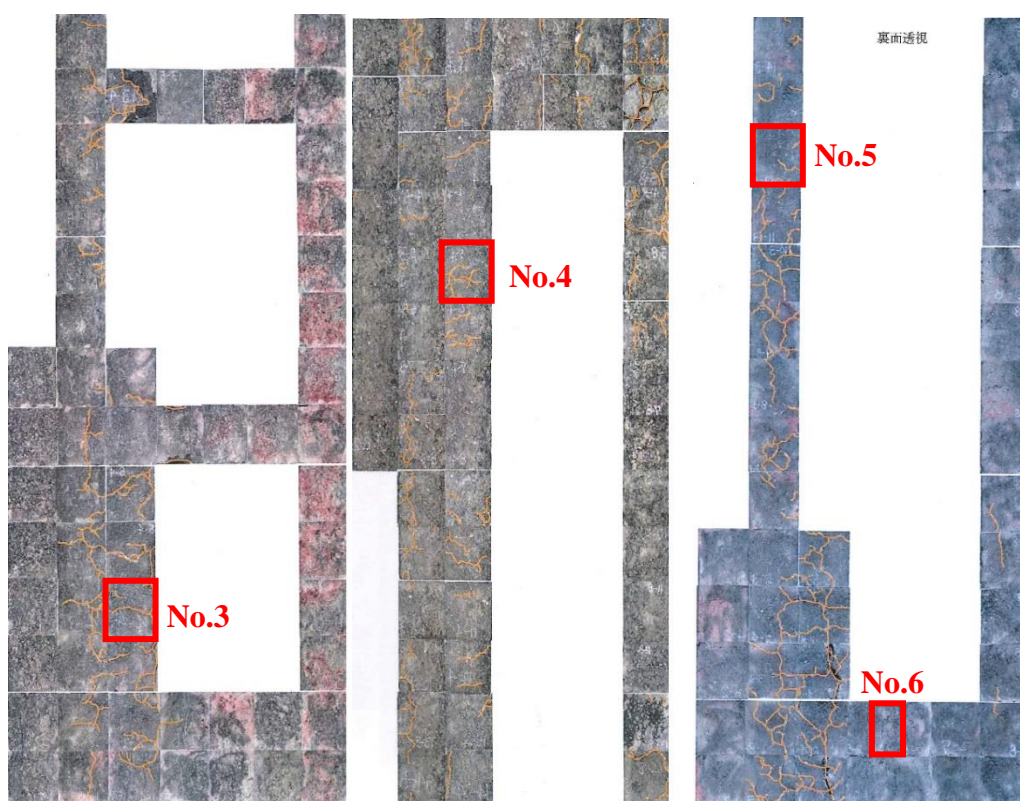


写真-4.2 アスコン層底部の写真 (72 工区)

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

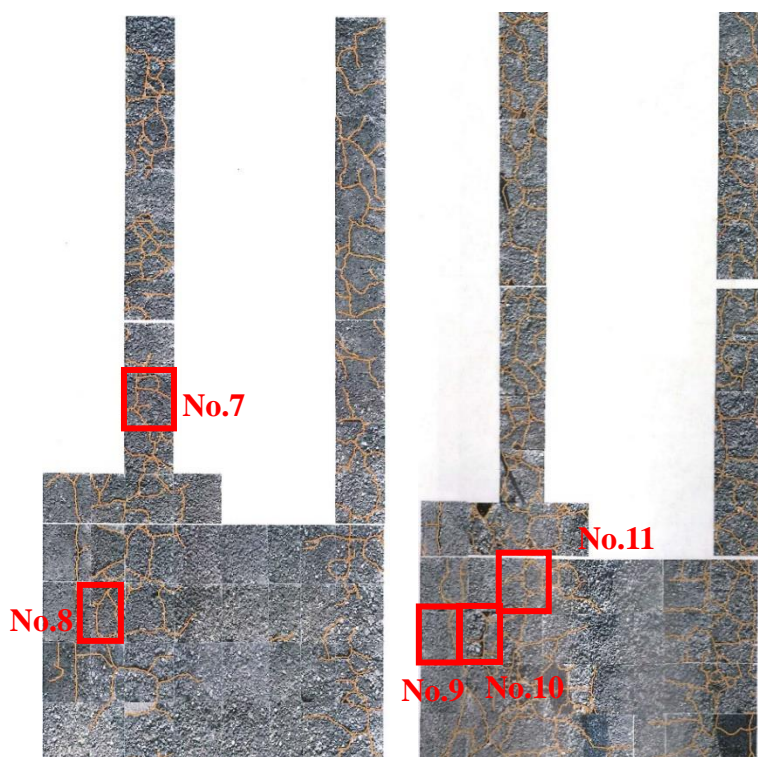


写真-4.3 アスコン層底部の写真 (39 工区)

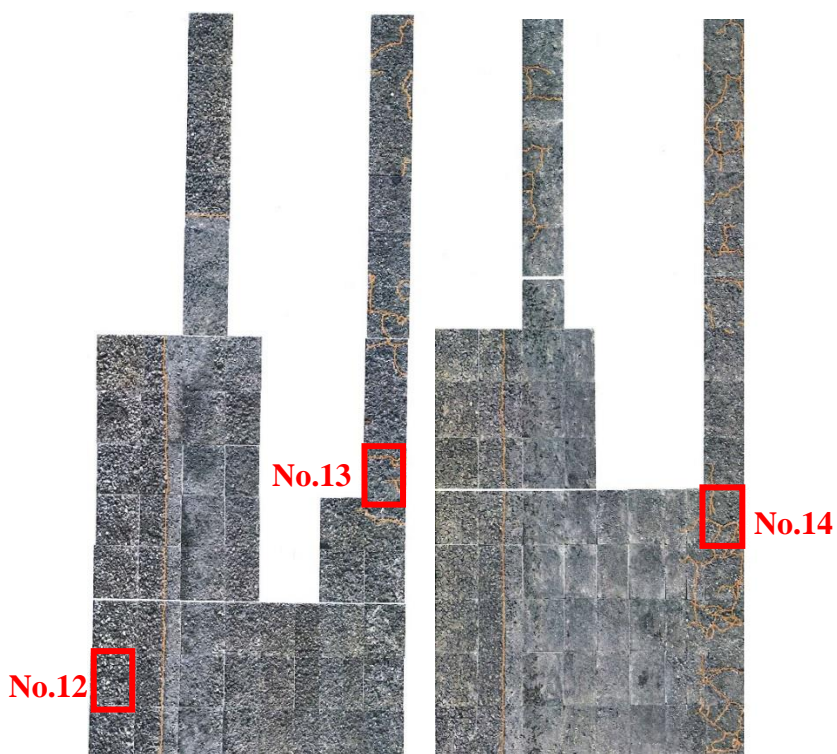


写真-4.4 アスコン層底部の写真 (姨捨工区)

4. 4 第4章のまとめ

第4章で得られた知見を以下にまとめる.

- 改質 H 型のスティフネスは, ストアスのスティフネスと比較して, 高温あるいは低速条件で高い値を示したが, アスコンのスティフネスを見ると, ポーラス混合物のスティフネスと連続粒度の混合物のスティフネスはほぼ同程度となった. これは空隙率による補正の影響を大きく受けているためと考えられる.
- バインダのスティフネスからアスコンのスティフネスを解析した結果, 周波数あるいは温度によってアスコンの推定スティフネスは大きく異なる. 周波数を 0.1 Hz, 1.0 Hz, 10 Hz で測定しているが, 連続粒度の表層や基層では, この条件で一般的なアスコンの弾性係数と概ね一致した. ポーラス混合物において, S_{bit} および複素せん断弾性率から求めたスティフネスは低く, とともに一般的なアスコンの弾性係数の範囲の下限側で推移していた. アスファルト安定処理混合物のスティフネスは, S_{bit} と複素せん断弾性率で異なり, S_{bit} から推定したアスコンのスティフネスよりも複素せん断弾性率から推定したアスコンのスティフネスのほうが高い値を示した.
- アスコン底面にはほとんどの工区でひび割れが生じていた. ひび割れがほとんど見られなかったのは 121 工区 (No.2) であり, 次に少ないのが姨捨工区 (No.13) であった.
- 日本道路協会から出版されている舗装設計便覧で示される式を用いて許容 49kN 換算輪数を算出した結果, アスファルトの性状試験から推定した S_{bit} と DSR 試験から求めた複素せん断弾性率から推定した許容 49 kN 換算輪数は, その絶対値は異なるが, 同様な傾向を示した. 複素せん断弾性率より求めた安定処理混合物のスティフネスは全体的に高い値であったため, 許容 49kN 換算輪数は小さい値であった.
- AI で提案されている式を用いて許容 49 kN 換算輪数を算出した結果, 舗装設計便覧で示される式とは傾向が大きく異なるものであった. これは, 舗装設計便覧と比較し, アスコンの飽和度の影響が大きいためと考えられる.

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と アスコンの疲労ひび割れに関する研究

- MEPDG では、一部で舗装設計便覧と同様な傾向を示していたが、ひび割れ箇所との明確な相関は見られなかった。
- 開削されたアスコンの底面にて生じているひび割れ箇所と許容 49kN 換算輪数を算出した結果、舗装設計便覧で示される式により算出した許容 49kN 換算輪数が高い数値となったのは、底面でひび割れが見られなかった 121 工区 (No.2) と比較的ひび割れの少なかった姨捨工区 (No.13) であった。このことからアスコン層底部で生じているひび割れの大小と許容 49 kN 換算輪数が高かった箇所が概ね一致している結果であった。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

第4章の参考文献

- [1] 公益社団法人日本道路協会, 舗装設計便覧 (平成 18 年度版), 丸善株式会社, 2006.
- [2] 笠原篤, 菅原照雄: 繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について, 土木学会論文集, 第 235 号, pp.87-98, 1975.
- [3] 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦: 低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 366 号, V-2, pp.143-151, 1986.
- [4] H. Di Benedetto, M. N. Partl, L. Francken and C. De La Roche Saint Andre : Stiffness testing for bituminous mixtures, RILEM TC 182-PEN PERFORMANCE TESTING AND EVALUATION OF BITUMINOUS MATERIALS, Vol.34, pp.66-70, 2001.
- [5] 峰岸順一, 阿波忠行: 一軸圧縮試験によるアスコンの弾性係数, 東京都技術研究所年報, pp.143-148, 1992.
- [6] 久利良夫, 佐藤彰紀, 鎌田修, 芳賀潤一, 児玉孝喜: 高温域を考慮したアスファルト混合物のスティフネス測定に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 13 巻, pp.39-46, 2008.
- [7] 前川亮太, 和地敬, 姫野賢治: 一軸繰返し圧縮・引張載荷実験に基づくアスファルト混合物のスティフネス変化, 土木学会舗装工学論文集, 第 15 巻, pp.15-22, 2012.
- [8] Asphalt Institute : Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), 9th Edition, Research Report No.82-2, 1982.
- [9] NCHRP : Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37 A Final Report, 2004.3.
- [1 0] ASTM: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, D7175-08, 2008.
- [1 1] AASHTO : Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, T315-12, 2012.

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49 kN 換算輪数と
アスコンの疲労ひび割れに関する研究

- [1 2] Javed Bari and Matthew W. Witzak : Development of a New Revised Version of the Witzak E*Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.75, pp.381-423, 2006.
- [1 3] Terhi Pellinen, Adam Zofka, Mihai Marasteanu and Noa Funk : Asphalt Mixture Stiffness Predictive Models, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.76, pp.575-626, 2007.
- [1 4] J. Read and D. Whiteoak : The Shell Bitumen Handbook Fifth edition, 2003.
- [1 5] 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会舗装工学論文集.E1 (舗装工学), Vol.71, No.3, pp.93-101, 2015.12.
- [1 6] Heukelom, W. and Klomp, A. J. : Road Design and Dynamic Loading, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.33, pp.92-125, 1964.
- [1 7] C. VAN DER POEL : A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Date, Journal of Applied. Chemistry, pp.221-236, 1954.

第5章 応力緩和に着目した縦表面ひび割れの
発生メカニズムとその要因に関する研究

第5章 応力緩和に着目した縦表面ひび割れの発生メカニズムとその要因に関する研究

5.1 緒言

アスファルト舗装上を車両が走行する際に、アスコン表面には圧縮ひずみ、アスコン下面には引張ひずみが生じ、理論設計法ではこの引張ひずみによる疲労破壊により、舗装寿命が解析される。実際の道路においては、アスファルト舗装に生じる破壊現象の一つとして、舗装表面に生じる縦表面ひび割れがある。

縦表面ひび割れを再現する方法は、既往の研究でいくつか試されており、ホイールトラッキング (WT) 試験機 [1] [2] や繰返し載荷試験機 [3] [4] を用いる方法、あるいは理論解析 [5] [6] [7] など様々な手法により検討されている。しかし、これらの研究では、タイヤ側面直下に生じるひび割れについて着目されており、タイヤ中心部直下に発生するひび割れの可能性について詳細な検討はなされていない。

本検討では、アスファルト舗装の縦表面ひび割れを再現するため、既往の研究と同様にゴム版上に WT 供試体を設置し、その上で走行試験を行った[1]。この結果、試験温度を 40°C、接地圧を 0.67 MPa にて繰返し走行させることで、タイヤ走行部の中央付近にてアスコンの表面にひび割れが生じることが分かった。さらに、車輪走行面と供試体の底面にひずみゲージを設置し、ひずみを測定した結果、供試体上部表面では圧縮ひずみ、供試体下部表面では引張ひずみが生じていた。

これらの結果を受けて、供試体表面にひび割れが生じる要因について考察し、アスコンが圧密を受けた後、直ちに応力緩和することで、供試体が復元する際には引張応力として作用しているのではないかと仮定した。そこで、アスコンで作製した円柱状の供試体に圧縮作用と引張作用をそれぞれ単独で繰り返して与え、応力の変化を評価した。

5. 2 ホイールトラッキング試験を用いた縦表面ひび割れの再現方法

5. 2. 1 試験概要

縦表面ひび割れの再現方法として、WT 試験機を用いることとした。既往の文献においてアスコンが低スティフネス状態のとき縦表面ひび割れが生じやすいことが述べられている。ここでは平均気温よりも高い 30°C から 50°C までの温度域を対象に試験を行った。既往の文献に従い、ここでの試験も WT 疲労試験と称する [1]。

表-5.1 に WT 疲労試験の試験条件、図-5.1 に WT 疲労試験の模式図、写真-5.1 に試験状況をそれぞれ示す。

表-5.1 WT 疲労試験の試験条件

項目	設定値
混合物の種類	密粒度アスファルト混合物(13)
試験温度	°C 30, 40, 50
走行速度	往復/min. 21
接地圧 ^{※1}	MPa 0.6~0.9
供試体寸法	mm 300×300×50
下層ゴム版の硬度 ^{※2}	30

※1 表-2を参照, ※2 JIS K 6253に準拠

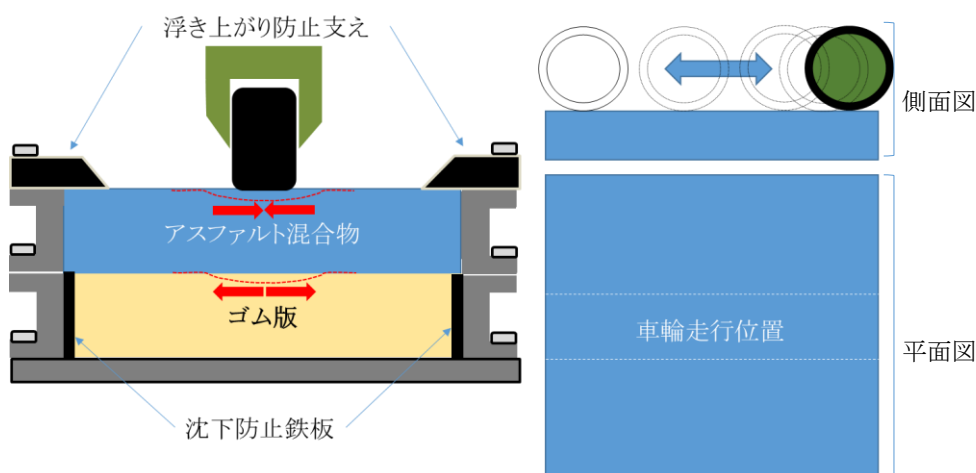


図-5.1 WT 疲労試験の模式図



写真-5.1 WT 疲労試験の実施状況

WT 疲労試験は、密粒度アスコン（13）（以下、密粒度（13））で WT 供試体を作製し、それをゴム版上に設置して供試体とした。供試体とゴム版の間に局部的に隙間が生じると、ひび割れの形状に影響を及ぼす可能性があるため、供試体とゴム版が接触する面にはアスファルト乳剤を予め塗布して密着させた。評価に用いたアスコンのバインダは、ストレートアスファルト 60/80 とした。設計アスファルト量は、マーシャル配合設計により 5.6%を得た。表-5.2, 5.3 に混合物の概要を示す。

表-5.2 試験に用いた密粒混合物（13）の配合

使用材料	配合割合(%)
6号碎石	35.0
7号碎石	24.0
粗目砂	11.0
細目砂	12.0
砕砂	12.0
石粉	6.0
アスファルト量	5.6

表-5.3 試験に用いた密粒混合物 (13) の概要

項目		合成粒度
通過 質量 百分率 %	19 mm	100
	13.2 mm	97.6
	4.75 mm	63.4
	2.36 mm	43.5
	600 μm	24.1
	300 μm	15.5
	150 μm	8.2
	75 μm	6.2
基準密度	g/cm ³	2.362
空隙率	%	4.0
飽和度	%	76.1

走行速度は、WT 試験に従い、1 時間に 1,260 往復 (2,520 回) とした。タイヤは一般的なソリッドタイヤを用いた。走行回数は、ひび割れが発生するまでとし、最長 12 時間 (30,240 回) とした。

タイヤが走行することにより、供試体全体が沈下しないようにゴム版の端部には走行方向と平行に 300 mm×50 mm×8 mm の鉄板を設置した。また、曲げ作用により供試体の端部が浮き上がらないように、走行方向と平行に供試体の端部を抑えるように支えを設置した。

ゴム版の硬さは、あらかじめ予備実験を行い、ひび割れが確認できたゴム硬度 30 (試験温度 : 20 °C) のものを用いることとした。

各温度におけるタイヤ接地面積を計測し、そこから接地圧を算出した。表-5.4 に各荷重および温度における接地圧を示す。

表-5.4 各荷重および温度における接地圧

試験温度	荷重686N	荷重883N	荷重1079N
30°C	0.71 MPa	0.78 MPa	0.83 MPa
40°C	0.67 MPa	0.74 MPa	0.79 MPa
50°C	0.65 MPa	-	-

5. 2. 2 試験条件の選定

目視により供試体表面にひび割れが確認できたときの各条件における走行回数を表-5.5に示す。写真-5.2にタイヤ中央部の直下に縦表面ひび割れが生じた供試体、写真-5.3にひび割れが生じた供試体を横断に切断した断面、写真-5.4にタイヤ側面の直下にひび割れが生じた供試体をそれぞれ示す。

試験は複数回実施しており、ひび割れが生じるまでの回数にばらつきはあるものの、温度が高く、また荷重が大きいほど走行回数が少なくなる傾向が見られた。

ひび割れ発生の有無およびその形状は、試験温度と接地圧により異なり、試験温度 30 °C では、通常のホイールトラッキング試験よりも高い接地圧とすることで縦表面ひび割れが生じた。試験温度 40 °C では、通常の WT 試験の荷重条件 (686 N) で 4~5 時間走行させることにより、タイヤ走行部でタイヤが折り返す端部の供試体表面に縦ひび割れが生じることを確認した。試験温度 50 °C とすると、荷重 686 N の試験条件にて、写真 - 5.4 に示すようにタイヤが走行する端部の混合物が陥没することで縦表面ひび割れが生じた。この原因として、タイヤ荷重により供試体が押し抜きせん断を受けてひび割れが生じたものと考えられる。これは、既往の研究とほぼ同様な結果であった [1]。試験温度 50 °C ではこれ以上荷重を増やしても損傷形態が変化しないと判断し、50 °C での荷重条件は 1 条件とした。

図-5.2に試験温度 40 °C、接地圧 0.67 MPa での縦表面ひび割れの発生、進展状況を示す。タイヤの走行速度が最も遅くなる供試体端部でタイヤ走行方向と同一方向に縦表面ひび割れが生じた。さらに走行を繰り返すと、供試体の中央部にまで進展した。試験中の供試

体の挙動を見ると、タイヤ荷重により混合物が下方に変形し、除荷されると供試体は元の高さ程度まで復元していた。

ここでの実験結果から、通常のホイールトラッキング試験の荷重条件にてが生じる試験温度が 40°C であったため、この条件を標準条件としてこれ以降の試験を実施することとした。

表-5.5 ひび割れが生じた走行回数

試験温度	荷重686N	荷重883N	荷重1079N
30°C	※	17,640~25,200回	7,560~15,120回
40°C	10,080~12,600回	5,040~7,560回	2,520~5,040回
50°C	2,520~5,040回 (陥没)	-	-

※測定時間内ではひび割れは生じなかった。



(試験温度:40°C, 接地圧:0.67MPa)

写真-5.2 走行部の中央に生じた縦表面ひび割れ

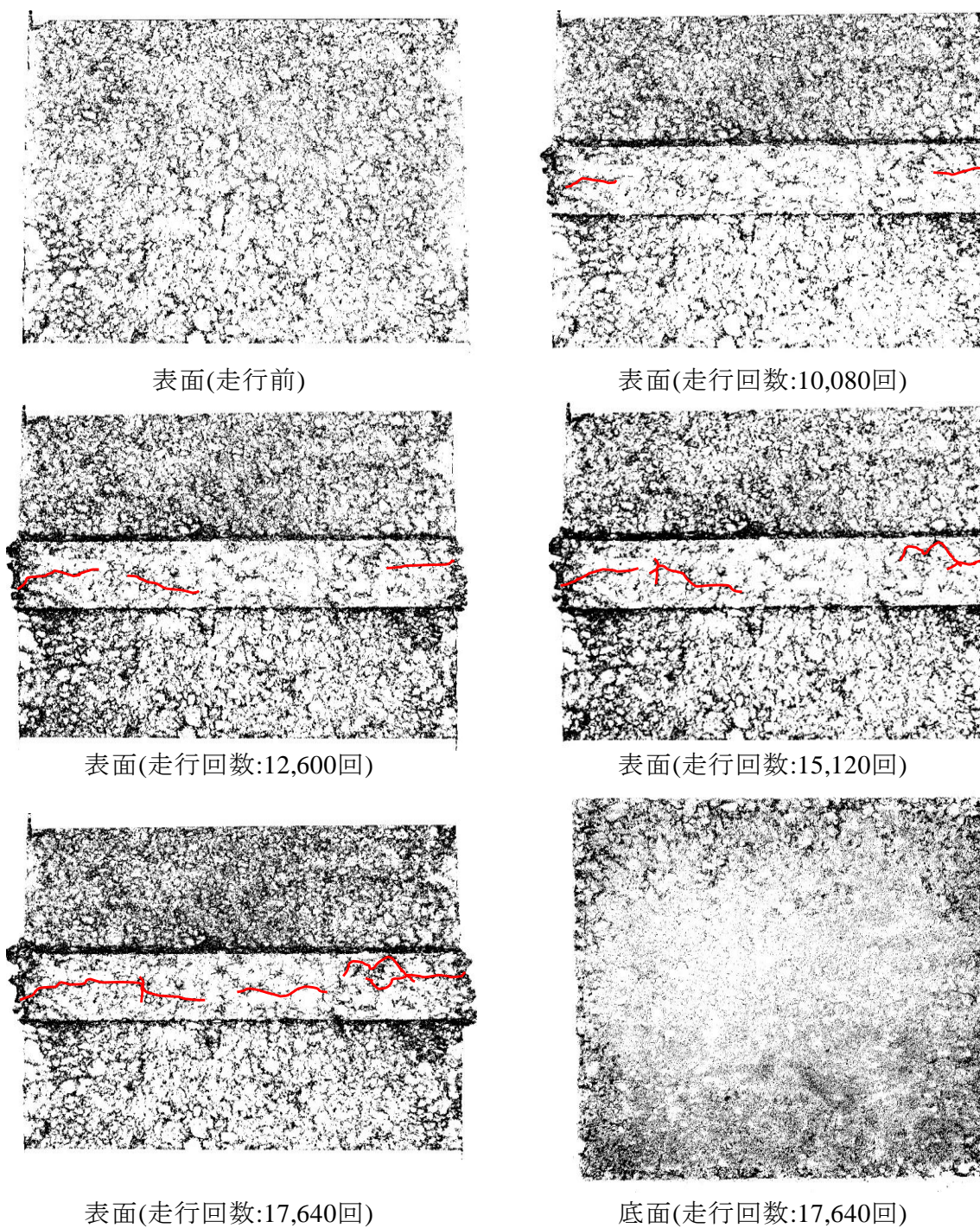


写真-5.3 車輪走行部の表面でひび割れが生じた供試体の断面写真



(試験温度:50°C, 接地圧:0.65MPa)

写真-5.4 タイヤ走行部分の端部に生じた縦表面ひび割れ



(試験温度:40 °C, 接地圧:0.67 MPa)

図-5.2 縦表面ひび割れの進展例

5. 2. 3 供試体に生じるひずみの測定

(1) 供試体表面と底部のひずみの測定方法

上記の検討の結果、タイヤを走行させることにより、供試体中央部に発生する引張ひずみにより、縦表面ひび割れが生じたものと考え、供試体の表面と底面にひずみゲージ（株東京測器研究所製：PLF10-11）を設置し、供試体に発生しているひずみの測定を試みた。

試験温度は低温から高温までを把握することを目的とし0℃から40℃とした。試験温度50℃では供試体の変形が著しいことからここでは除外した。

図-5.3にひずみゲージの設置位置を示す。ひずみゲージの設置位置は、タイヤ走行部でタイヤが折り返す端部とし、それぞれ供試体の表面と底面に設置した。表面部に設置するひずみゲージは、走行中に破損する可能性があるため、写真-5.5に示すとおり、設置位置に金型によって1mm程度のくぼみをつけてから設置した。

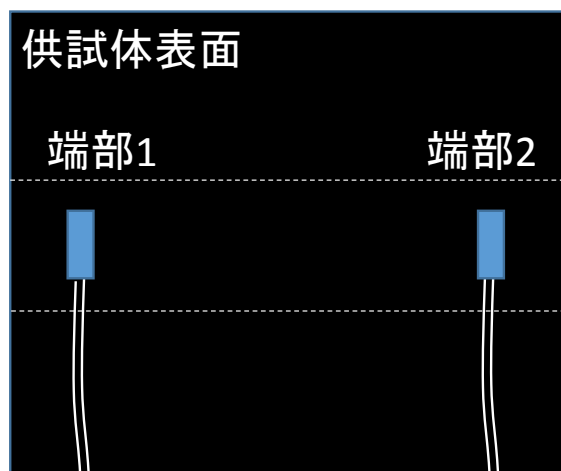


図-5.3 ひずみゲージの設置位置

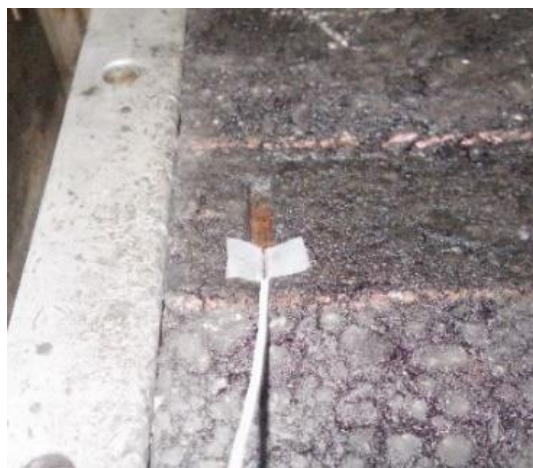


写真-5.5 表面に設置したひずみゲージ

(2) 測定結果

開始 3 分経過したのちに計測した、20 秒間の供試体端部の平均ひずみデータを図-5.4 に示す。図-5.4 (a) ~5.4 (c) と図-5.4 (d) ~5.4 (e) は縦軸のスケールが異なる。測定の結果、試験温度が 0 °C あるいは 10 °C では、底面に生じる引張ひずみと表面に生じる圧縮ひずみはほぼ同程度の値であった。温度が高くなるに従い、圧縮ひずみと引張ひずみともに値が大きくなり、特に引張ひずみが大きい。

表面に生じる圧縮ひずみよりもかなり大きな引張ひずみが底面に発生しているにもかかわらず、最初にひび割れが生じるのは、タイヤが折り返す端部でタイヤ中央部直下の表面であった。

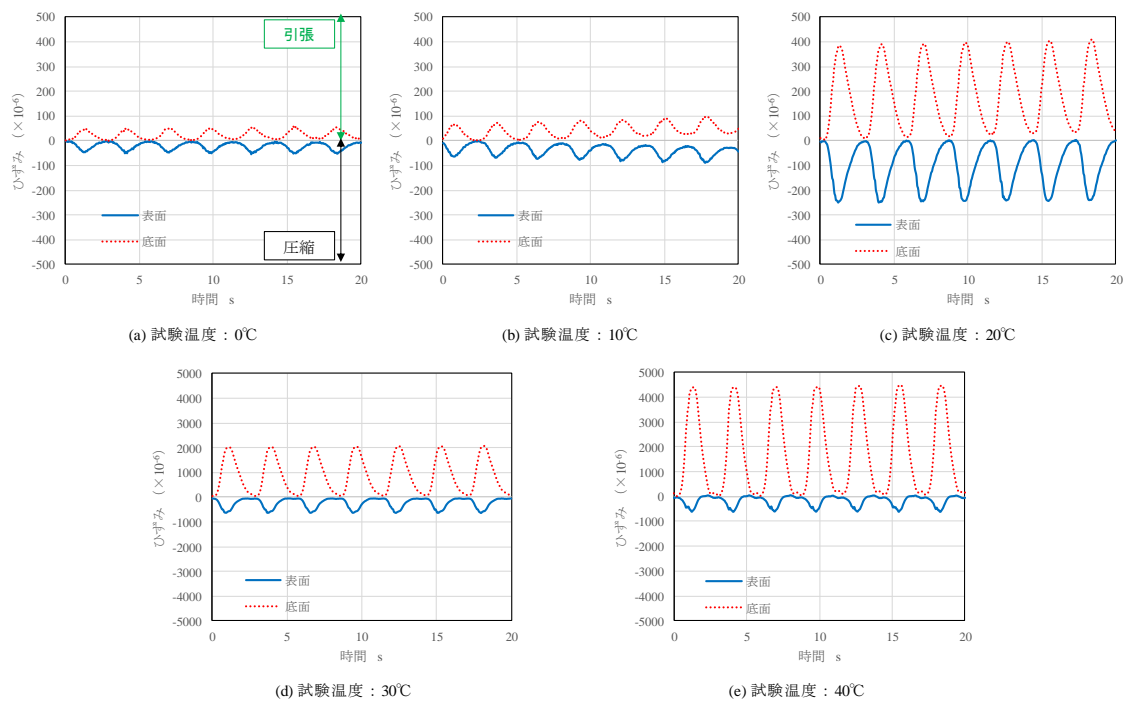


図-5.4 供試体に生じたひずみの測定結果

タイヤ走行時に局部的に荷重がかかることでひび割れが生じている可能性があるため、走行時の接地圧分布を FUJIFILM 製の圧力測定フィルムを用いて測定した。

写真-5.6 にタイヤ接地圧分布の測定結果を示す。供試体表面の接地圧は一様な分布ではないものの、ひび割れの原因となるような局所的な荷重の負荷は見られなかった。

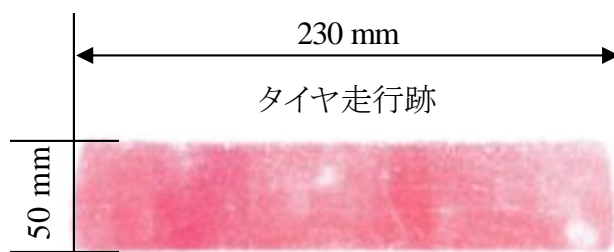


写真-5.6 タイヤ走行位置における接地圧分布の測定結果

5.3 応力緩和性能の評価

粘弾性材料の特長として応力緩和性能がある [8] [9]. 図-5.6 に一定の圧縮ひずみを与えた時の時間変化と応力の変化の概念図を示す. 弾性体であれば, 応力緩和されず一定の応力を維持するが, 粘弾性体であるアスコンは荷重がかけられると一定の時間経過したのち応力が緩和される. そこで, アスコンがどの程度の時間で応力が緩和されるかについて実験を行った [10].

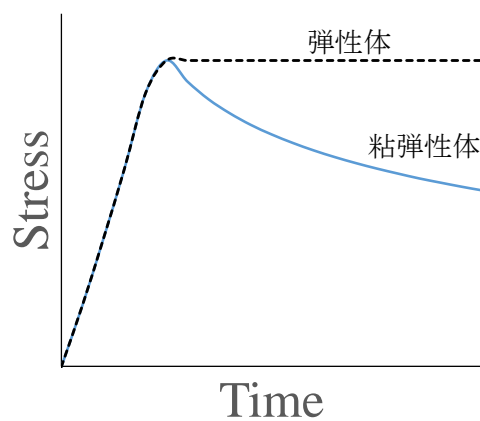


図-5.6 圧縮ひずみを与え保持した時の応力変化の概念図

(1) 試験方法

表-5.6 に試験条件, 図 5.7 に切り出した供試体と試験のイメージ図を示す.

供試体は, 転圧した面と平行となるように $\phi 100 \times 100$ mm の寸法にて円柱状に混合物を切り出して作製した. 試験治具はエポキシ樹脂により接着した. 混合物の種類は上記と同様である. WT 疲労試験にて車輪走行表面にひび割れが生じた 600μ に設定した.

表-5.6 圧縮試験の試験条件

項目	内容
試験温度	20°C, 40°C
速度	10mm/min.
供試体の寸法	$\phi 100 \times 100$ mm
圧縮ひずみ	600 μ

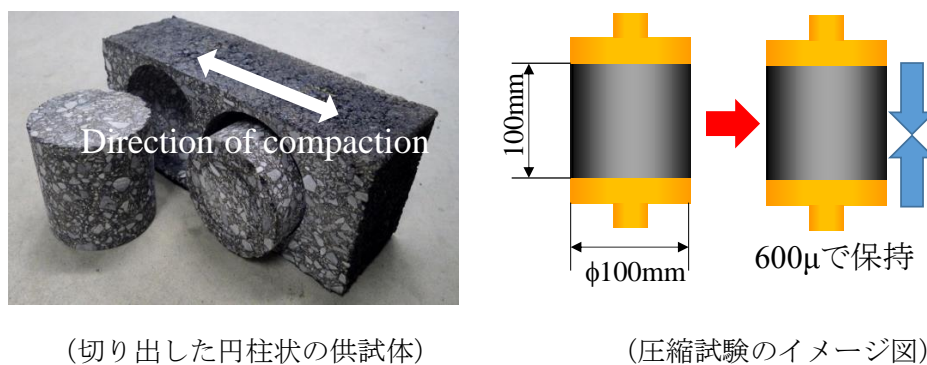


図-5.7 圧縮試験に用いる供試体と試験のイメージ図

(2) 試験結果

図-5.8 に圧縮試験時に得られた荷重の変化を示す.

アスコンの応力緩和性能により, 応力は時間とともに低下する. 試験温度 20°C では最大荷重到達から 0.5 秒後にまだ 70 %程度の残留応力が見られる. 一方, 試験温度 40°C では

0.5秒後に応力が40%程度まで緩和されている。温度が高かつ荷重時間が長ければ、タイヤ荷重から解放された時点で、舗装表面に生じた圧縮応力は半分程度まで緩和される可能性がある。このことから、表層に生じた圧縮応力が緩和されれば、復元時の舗装表面に引張応力が作用する可能性がある。この引張ひずみが原因により供試体表面にひび割れが生じたと考えられる。

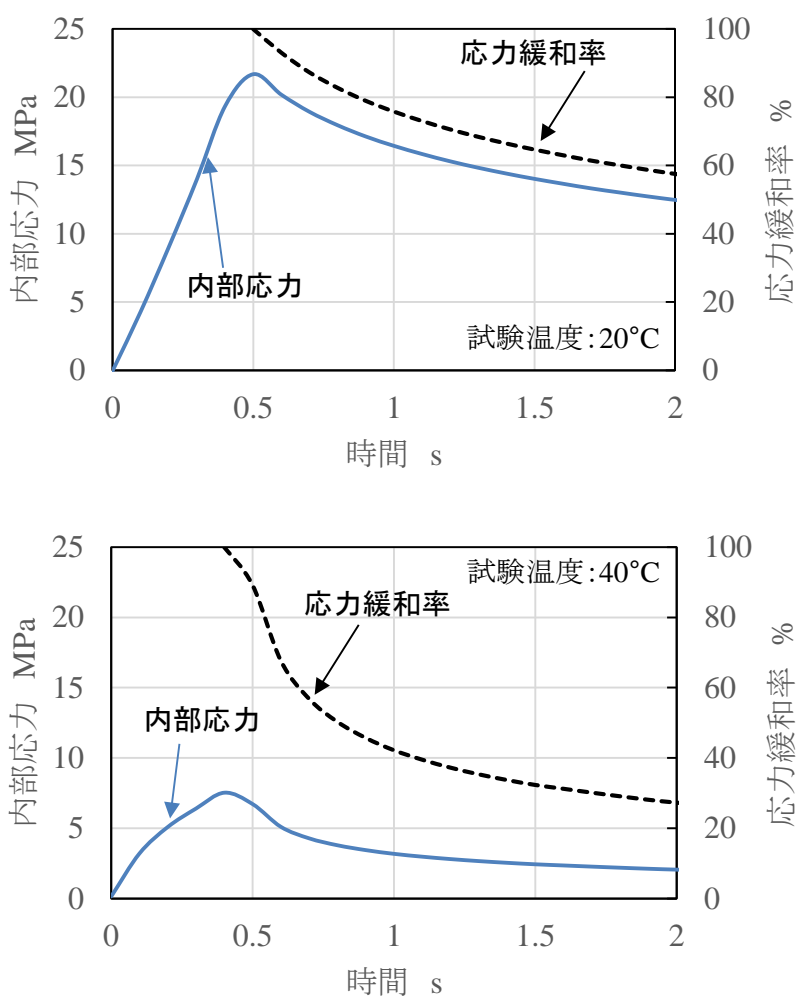


図-5.8 圧縮試験における時間-応力曲線と応力緩和率

5. 4 Push-Pull 試験による応力の評価

5.3 では、静的載荷により応力緩和時間について検討した。ここでは、引張作用や圧縮作用をそれぞれアスコンに繰り返して与え、このときの応力状態や破壊状態を把握することとした。

5. 4. 1 評価方法

図-5.9 に Push-Pull 試験の概念図、写真-5.7 に載荷装置に供試体を設置した状況を示す。試験に用いた試験体は、 $300 \times 300 \times 100$ mm の平板状のアスコンを作製し、転圧した面と平行となるように $\phi 50 \times 100$ mm の寸法で円柱状に切り出したものである。切り出した供試体の上下端部に引張接着用治具をエポキシ樹脂で接着した。

試験は、供試体を圧縮側と引張側にそれぞれ sin 波により載荷し、応力状態を評価した。ひずみの値は、供試体上部に非接触の変位計を設置し、変位データを供試体の高さで除して求めた。応力値は供試体上部に設置したロードセルにより測定した。WT 疲労試験では載荷時間がおおむね 1 秒であったことから、ここでの周波数は 1 Hz とした。表-5.7 に試験条件を示す。

Push-pull 試験を行う前に初期に載荷する圧縮荷重と引張荷重を設定するため、予備実験を行った。その結果、試験温度 20°C においても即時に応力緩和してしまい、圧縮荷重や引張荷重を供試体に作用させた状態で繰り返し載荷を行うことは難しいと分かった。そこで、引張応力と圧縮応力が均等に生じるように、一定のひずみにて繰り返し載荷し、試験中に圧縮方向あるいは引張方向に変位させ、供試体に生じる応力の変化を把握することとした。

セメントコンクリート舗装では、わだち割れは主な損傷として見られない[11]。そこで、アスコンに対して試験を行う前に、市販のセメントコンクリート版より表中の寸法で供試体を切り出したものについて試験を実施した。ここで用いたセメントコンクリートの曲げ

強度は 7.0 MPa である。ひずみ振幅は、試験温度 20 °C におけるホイールトラッキング疲労試験で供試体底面に生じたひずみを参考とし 400×10^{-6} に設定した。

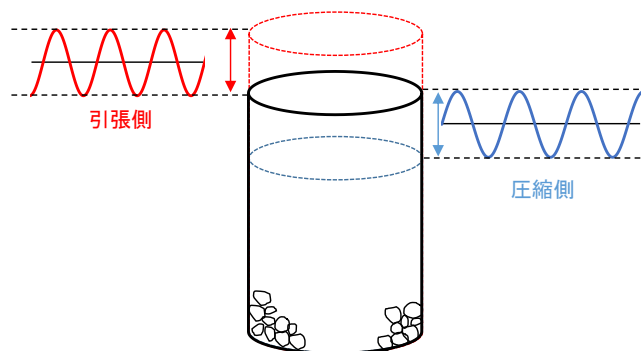


図-5.9 Push-Pull 試験の概念図



写真-5.7 Push-pull 試験の供試体設置状況

表-5.7 Push-pull 試験の試験条件

項目	内容
制御波	sin波, 1Hz
試験温度	20°C
供試体寸法	φ100 mm×50 mm
試験数	各3個
ひずみ振幅	セメントコンクリート: 400×10^{-6} アスファルトコンクリート: 600×10^{-6}

5. 4. 2 評価結果

(1) セメントコンクリート供試体を用いた評価結果

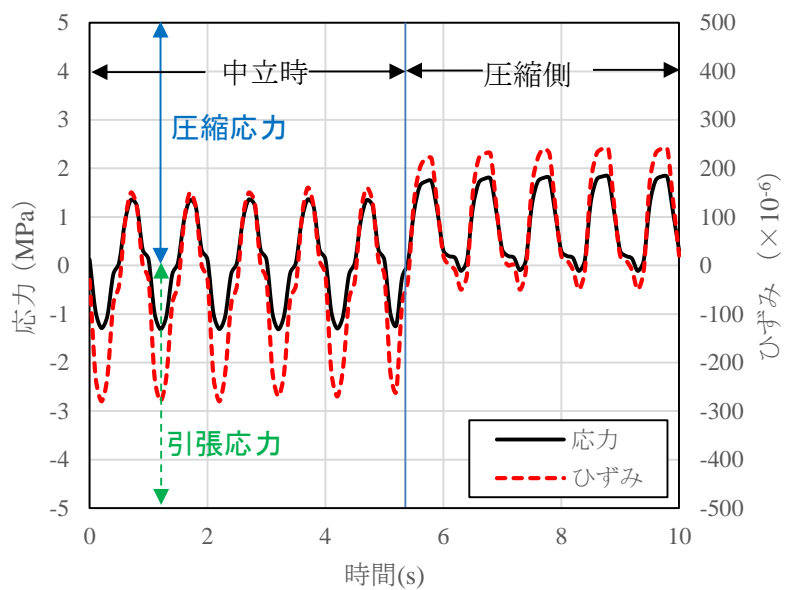
繰り返し載荷を一定時間かけた後、ひずみが圧縮領域となるように圧縮方向に変位させた場合の応力とひずみの変化を図-5.10 (a) に示す。同様に、引張方向に変位をシフトさせた場合の応力とひずみの変化を図-5.10 (b) に示す。

セメントコンクリートは弾性体に近いため、応力緩和の影響は認められず、圧縮側で sin 波状のひずみを与えた場合には上下に変動する圧縮応力が、引張側でひずみを与えた場合には上下に変動する引張応力がそれぞれ生じている。

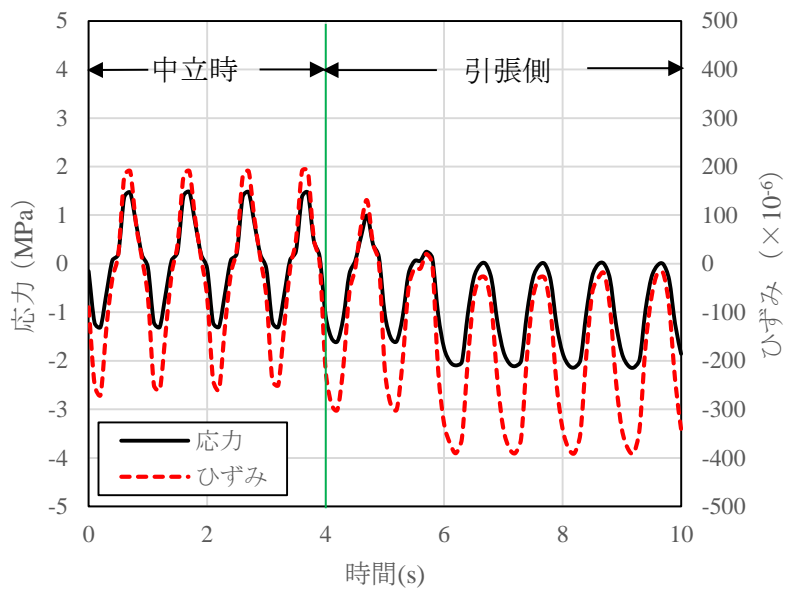
(2) アスコン供試体を用いた評価結果

ひずみ振幅を 400×10^{-6} にすると発生する応力が小さすぎて有意なデータの取得が難しかったため、アスコンではひずみ振幅を 600×10^{-6} として繰り返し載荷を与えることとした。図-5.11 (a), (b) にその試験結果を示す。

アスコンでは、圧縮側および引張側に変位させたときはそれぞれの方向にわずかに応力が高くなったが、即時に応力緩和してしまい、セメントコンクリートとは異なって、圧縮応力と引張応力が交互に生じる挙動に戻った。この試験条件において破壊までの回数を確認したところ、引張側に変位させたほうが破壊に至るまでの回数は少なかった。

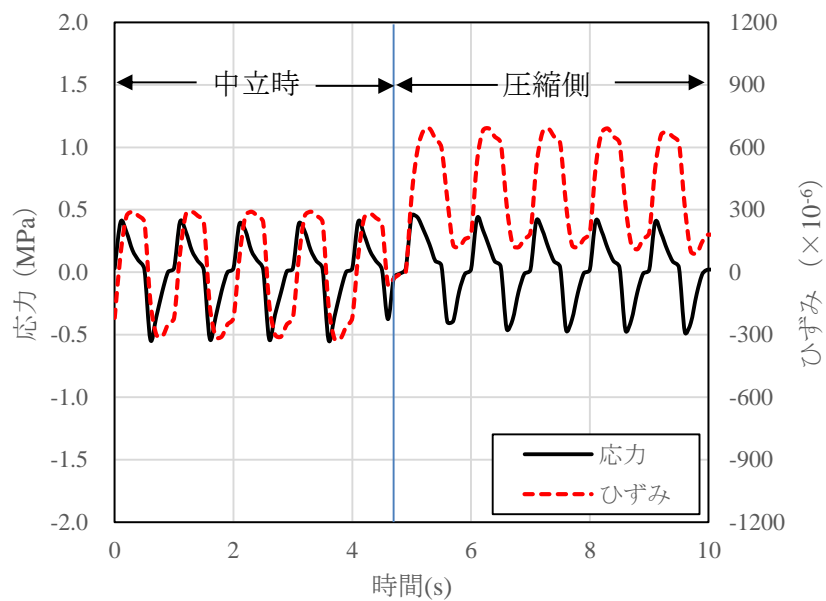


(a) 圧縮側にシフト

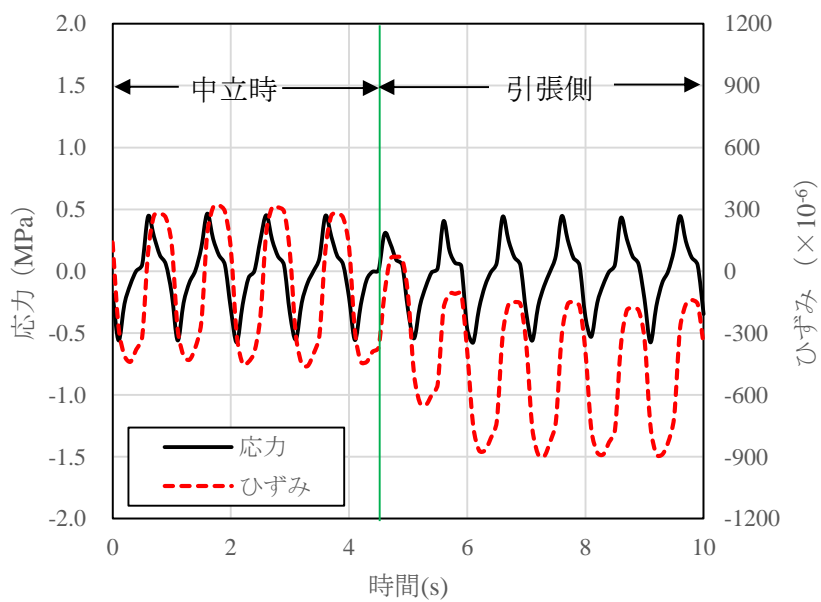


(b) 引張側にシフト

図-5.10 Push-Pull 試験により供試体に生じた応力変化 (セメントコンクリート)



(a) 圧縮側にシフト



(b) 引張側にシフト

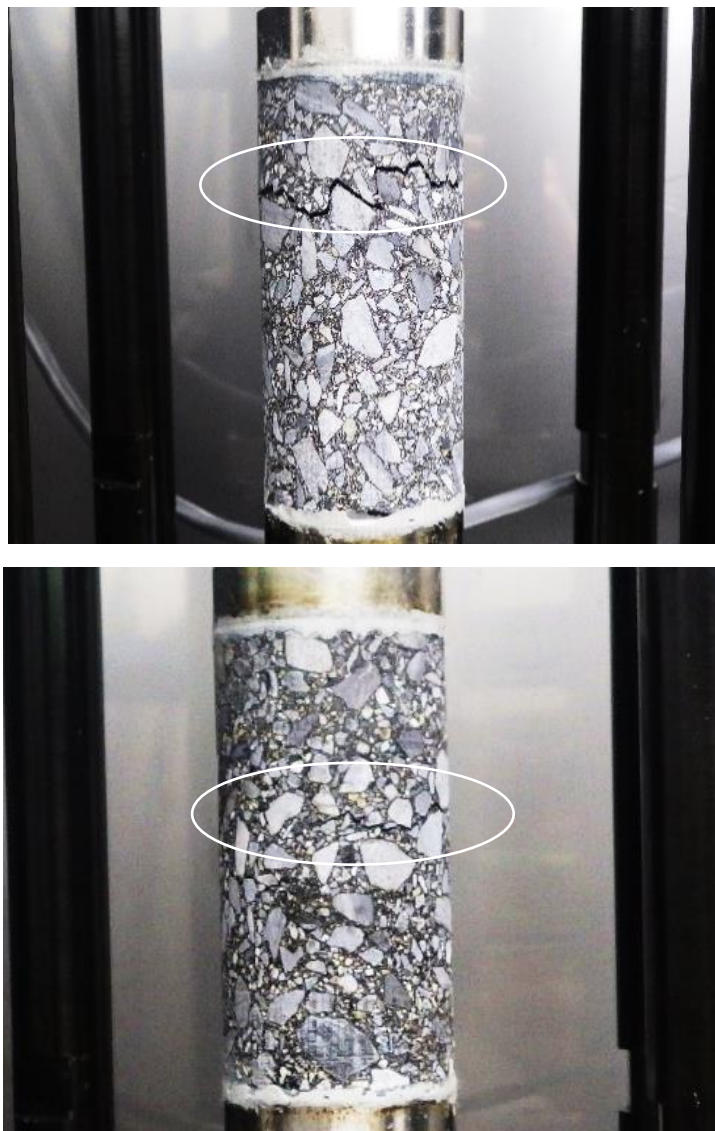
図-5.11 Push-Pull 試験により供試体に生じた応力変化 (アスコン)

写真-5.8に示すように、破壊の形態を見ると圧縮側に変位させた場合も、すべり面におけるひび割れは見られず、直接引張試験で見られるひび割れと同様なひび割れが生じた。以上のことから、アスコンは、繰返し圧縮作用を受けた場合でもひび割れが生じることが確認された。図-5.20(a)で見られるように、圧縮変位を与えても瞬時に応力が緩和してしまい、変位を戻す際に引張応力が生じることでひび割れが生じたものと考えられる。

試験温度 20 °C よりも 40 °C のほうが、アスコンは応力緩和性能が高いため、高温の条件では早期に応力緩和する [10]。さらに、タイヤ荷重による変形量も 40 °C のほうが大きいため、復元時の変形量も大きいことが予想される。

以上のことから、アスコン表面では、タイヤ荷重により圧縮作用を受けるが、アスファルトによりその応力が緩和されると、残留ひずみは引張応力を伴って復元する。WT 疲労試験にて供試体表面にひび割れが生じた原因として、ここで生じた引張応力によるものと考えられる。同様に、実際のアスファルト舗装の表面においても交通荷重による圧縮側の変形を繰返し受けても、疲労ひび割れが生じるものと考えられる。

WT 疲労試験では、底面からのひび割れが見られなかった。この原因については、明確な試験データが得られていないが、供試体底面では上面と異なり、局部的に変形が集中しなかったため、ひび割れが生じにくかったものと推測される。



上段 圧縮作用時，破壊に至るまでの回数：36,000回

下段 引張作用時，破壊に至るまでの回数：15,000回

写真-5.8 供試体に生じたひび割れ

5. 5 弾性解析によるアスファルト舗装に生じるひずみの比較

多層弾性解析プログラム「GAMES」を用いて図-5.12に示す一般的なアスファルト舗装モデルに対するアスコン層表面の圧縮ひずみと底面の引張ひずみを算定した [12]。着目したひずみはアスコン表面に生じる圧縮ひずみとアスコン底面に生じる引張ひずみである。アスコン層の弾性係数は、20℃で想定される4000 MPa [13]（常温の場合）とその値の1/10となる400 MPa（高温の場合）の2種類に設定した。

解析の結果は図-5.13に示すとおり、アスコンの弾性係数が大きい場合は、表面、底面とも同程度の圧縮あるいは引張ひずみであったが、高温時あるいは低速時などアスコン層の弾性係数が小さい場合は、表面の圧縮ひずみのほうが底面の引張ひずみよりも絶対値が大きかった。WT疲労試験では、ひび割れが発生したときのひずみが図-5.4(e)に示したように、 600×10^{-6} 程度であったことから、アスコン層の表面にタイヤ走行方向でひび割れが生じる可能性は十分考えられる。

Push-Pull試験で示されたようにアスコンが応力緩和した場合、圧縮作用によっても疲労破壊する可能性がある。多層弾性解析においても、舗装表面がもっともひずみの絶対値が大きくなるため、ひび割れは表面に生じる可能性がある。ただし、アスファルトの劣化が進行すると応力緩和性能は低下し、弾性体に近づくことにより、底面に生じる引張応力による破壊が顕著になるのではないかと考えられる。

本研究では、アスファルトの長期供用劣化による粘弾性状を把握することを目的としており、アスファルトが劣化することによる応力緩和性能の変化については今後の研究課題とする。

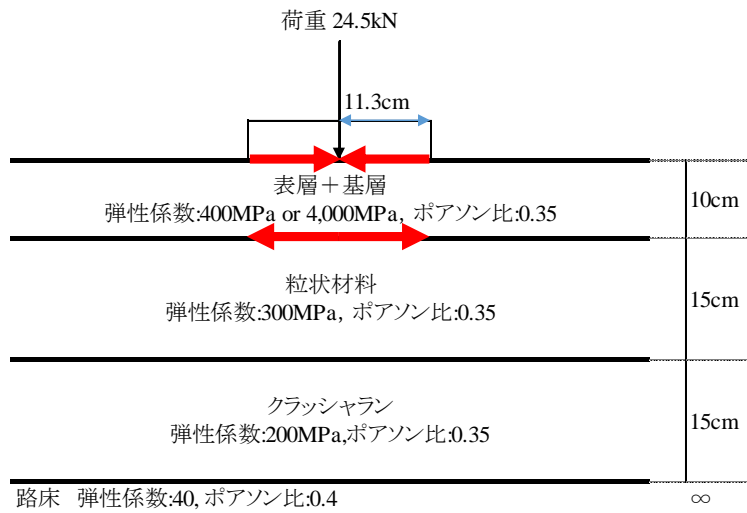


図-5.12 解析に用いた舗装構成および各パラメータ

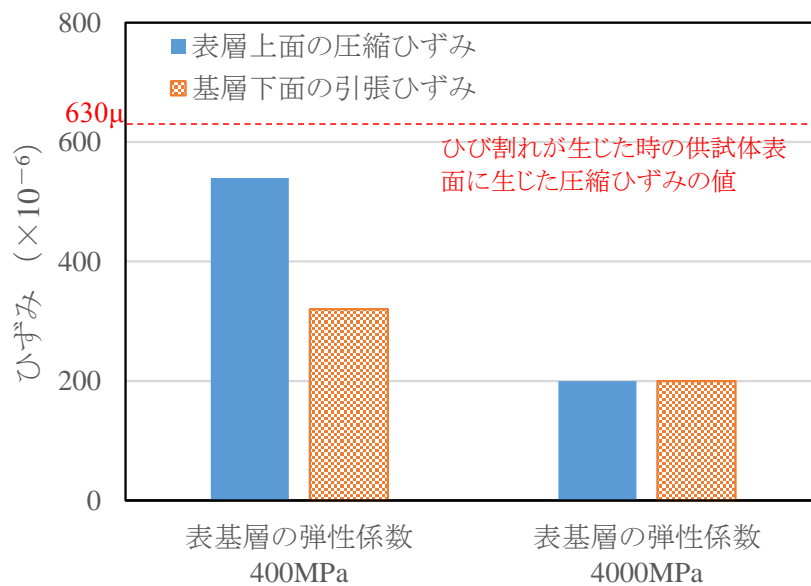


図-5.13 アスコン層上下面のひずみ解析結果

5. 6 第5章のまとめ

第5章によって得られた知見を以下に示す.

- WT 疲労試験により, アスコンのタイヤ走行部直下に, 走行方向と同一方向の縦表面ひび割れを発生させることができた.
- 試験温度が高い, あるいは接地圧が高い場合は, タイヤ走行部の端部においても縦表面ひび割れが生じる場合がある. この原因は, タイヤ荷重によって供試体表面にせん断作用が生じたことによると考えられる.
- 縦表面ひび割れが生じた原因について検討するため, アスコンに圧縮側と引張側のそれぞれで繰り返し载荷を行う **Push-pull** 試験の結果, 両方の条件においてアスコンは瞬時に応力が緩和してしまい, 引張側でも圧縮応力が, 圧縮側でも引張応力が生じる.
- 円柱状のアスコンに 600×10^{-6} のひずみを圧縮作用, あるいは引張作用を周波数 1Hz で繰り返し与えた結果, 同一形状のひび割れが生じた.

第5章の参考文献

- [1] 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦: アスファルト混合物の拡張された疲労破壊規準に関する研究, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.259-268, 1987.2.
- [2] 内田喜太郎, 黒川勤, 姫野賢治, 西澤辰男: アスファルト混合物のクラックに対する高温時のヒーリング特性, 土木学会舗装工学論文集 第7巻 2002.12
- [3] 片脇清士, 川西礼緒奈: アスファルト舗装のわだち割れ発生原因に関する一考察-室内試験方法の提案と発生条件の検討-, 道路建設, pp.64-69, 1993.1.
- [4] Kazushi Komoriya, Takeshi Yoshida, Hiroyuki Nitta : WA-DA-CHI-WA-RE Surface Longitudinal Cracks on Asphalt Concrete Pavement, TRB, 2001.
- [5] 西澤辰男, 松野三朗: アスファルト舗装におけるわだち割れ周辺のひずみ状態に関する研究, 道路建設, pp.56-62, 1992.11
- [6] Matsuno,S.and Nishizawa,T. Longitudinal Surface Cracking of Flexible Pavement, Proc.Paving in Cold Areas Mini-Workshop, Canada/Japan Science Technology Consultation, 1984, pp.779-796
- [7] 石倉裕明, 西澤辰男, 松野三朗, 有限要素法によるアスファルト舗装表面ひずみの解析, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 1984
- [8] 森吉昭博: アスファルト混合物の流動を伴う領域の応力緩和現象と破壊に関する研究, 土木学会論文集, 第414号, V-12, pp.185-193, 1990.
- [9] Dongré, Raj : EFFECT OF PHYSICAL HARDENING ON STRESS RELAXATION BEHAVIOR OF ASPHALT BINDERS ,2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona , pp.220-228 , 2000.
- [10] 社団法人日本道路協会, 舗装設計施工指針(平成18年度版), 丸善株式会社, pp.40-

41,

- [1 1] Toshiaki Hirato, Kenji Himeno, Masato Murayama, A study of Longitudinal Crack which occurs to the Surface of Asphalt pavement by Wheel Tracking test, Rilem, pp.81-87, 2016.
- [1 2] 公益社団法人土木学会 舗装工学委員会：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，2005.
- [1 3] 社団法人日本道路協会，舗装設計便覧（平成 18 年度版），丸善株式会社，p.118，2006.

第6章 結 論

第6章 結 論

アスファルト舗装の破壊は、供用期間中に交通車両が走行することによる繰返し载荷からの疲労の累積、あるいは環境劣化に伴うアスファルトの硬化により生じるものと考えられている。疲労破壊については理論解析により様々な方法が提案されている。一方、アスファルトの劣化は、アスファルトの代表的な性状試験である針入度により評価されているが、針入度ではアスファルトの種類の違いあるいは試験温度による影響を統一的に評価することが難しく、また理論設計でその数値を取り扱うことができない。そこで、本研究では、長期供用された高速道路のアスファルト混合物から採取したアスファルトと室内促進劣化させたアスファルトの粘弾性状を測定し、新たな劣化指標について検討した。

次に、アスファルト舗装では、舗装表面に車両が走行する箇所がかつ進行方向に縦表面ひび割れが生じるが、この現象は弾性体に近いセメントコンクリート舗装では見られず、その発生原因について、国内外で活発に研究がなされているが、いまだ明確な結論が得られていない。そこで、粘弾性体であるアスファルト舗装の応力緩和性能に着目して、アスファルト混合物に圧縮作用を繰返し与えてその応力とひずみを解析し、縦表面ひび割れの発生メカニズムについて検討した。

以下に、各章で得られた知見を示す。

第2章では、

- (1) 高速道路から採取したアスコンについて抽出試験を行った結果、アスファルト舗装の内部、特にアスファルト安定処理混合物においても、アスファルトは劣化しており、その進行程度は混合物の配合や損傷程度により異なる。
- (2) 針入度と伸度あるいは軟化点の関係を調査した結果、針入度が低下するほど伸度は低下し、軟化点が上昇していた。また、ポーラスに使用される改質H型では、針入度が低下していてもストアスと比較し、伸度が高い値を示していた。
- (3) 健全部の車輪通行部と車輪非通行部における表層混合物から抽出したアスファルト

の性状を比較した結果、密粒度では既往の文献と同様に、車両非通行部のほうが劣化は進行していたが、ポーラスでは明確な違いが見られなかった。これはポーラスでは、空隙率が非常に高いため、車両通行による空隙率の変化に対する影響を受けにくいものと考えられる。

- (4) 高速道路の調査結果より、供用7年のポーラスに用いられている改質H型と供用19年の密粒度に用いられているアスファルトの針入度は同程度であり、建設当初のストアスと改質H型の針入度の差異を考慮しても、密粒度よりもポーラスのほうが針入度は低下しやすいと考えられる。
- (5) アスファルトが劣化し複素せん断弾性率が高くなると位相角は低下する。ストレートアスファルトであれば、現道から採取した試料と促進劣化後の試料ではほぼ同程度の値で推移することが分かった。さらに、複素せん断弾性率が10 MPa以下では、回収アスファルトと回収改質H型ではその挙動が異なるが、10 MPa以上であれば、回収アスファルトと回収改質H型ではほぼ同様な値で推移していた。
- (6) 損傷が見られたアスファルトのスティフネスは10 MPa以上、複素せん断弾性率および損失せん断弾性率は5 MPa以上、貯蔵せん断弾性率は3 MPa以上、位相角では1.0 rad以下の値となっていた。特に複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係は、室内にて促進劣化させた試料、現地採取した回収アスファルトあるいは回収改質H型についてすべて同一直線上で評価できることから、劣化程度の一つの指標となりえる。

第3章では、

- (1) 現場から得られた試料による性状試験と促進劣化させた試料による性状試験について、検証したところ、バインダ単体の促進劣化試験では、改質H型のほうがストアスよりも針入度残留率は高い値であったが、混合物による促進劣化試験では、ストアスと改質H

型の針入度残留率は同程度であった。このことは、実路での現象を再現しており、空隙率の高いポーラスではアスファルトが劣化しやすいと考えられる。

- (2) 混合物の配合が同じであれば改質アスファルトのほうが劣化進行は緩やかである。
- (3) アスファルトの劣化進行は混合物の配合により異なる。実際のアスファルト舗装における劣化状態をシミュレートするためには、使用する混合物配合を考慮する必要がある。
- (4) 室内試験により促進劣化させたアスファルトのスティフネスと DSR 試験から得られる複素せん断弾性率には、促進劣化時間、载荷時間あるいは試験温度に関わらず高い相関が見られた。また、測定温度が高くなるか、または载荷時間が長くなるに伴い各弾性率はそれぞれ低下するが、複素せん断弾性率や損失せん断弾性率と比較して、貯蔵せん断弾性率の低下が最も大きい。さらに、促進劣化時間が長くなるに伴いアスファルトは弾性的性質が強くなるため、位相角は小さくなる傾向が見られた。
- (5) 室内試験により促進劣化させたアスファルトと供用劣化を受けたアスファルトのスティフネスは、载荷時間や試験温度に関わらず、同様な傾向を示す。このことから、促進劣化によりアスファルトの供用後のスティフネスを再現することは可能と考えられる。
- (6) DSR 試験より得た複素せん断弾性率とノモグラフより得たアスファルトのスティフネスは非常に相関が高い。このことから、DSR 試験によりアスファルトのスティフネスを推定することは十分可能である。ただし、ノモグラフより得たスティフネスと DSR 試験より得た複素せん断弾性率は 1 : 1 とならない。これはノモグラフより推定するスティフネスは針入度や軟化点など静的試験により推定しているのに対し、DSR 試験は動的試験であることおよびノモグラフでは試験温度 2 点により推定しているのに対し、DSR 試験では各温度で測定していることから値に違いが生じるものと考えられる。
- (7) DSR 試験により得られる複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係は、測定温度、载荷時間、促進劣化させた試料と現場から得た試料、アスファルトの種類に関わらず、両対数軸上で直線関係にあることが明らかとなった。

第4章では、

- (1) 改質 H 型のスティフネスは、ストアスのスティフネスと比較して、高温あるいは低速条件で著しく高い値を示したが、アスコンのスティフネスを見ると、ポーラス混合物のスティフネスと連続粒度のストアス混合物のスティフネスはほぼ同程度となった。これは空隙率による補正の影響を大きく受けているためと考えられる。
- (2) バインダのスティフネスからアスコンのスティフネスを解析した結果、周波数あるいは温度によってアスコンの推定スティフネスは大きく異なる。周波数をここでは 0.1 Hz, 1.0 Hz, 10 Hz で測定しているが、連続粒度の表層や基層では、この条件で一般的なアスコンの弾性係数に概ね入っていた。ポーラス混合物では S_{bit} および複素せん断弾性率から求めたスティフネスは低く、ともに一般的なアスコンの弾性係数の範囲の下限側で推移していた。複素せん断弾性率から算出した安定処理混合物のスティフネスでは、この範囲の上限側で推移していた。
- (3) 日本道路協会から出版されている舗装設計便覧で示される式を用いて許容 49 kN 換算輪数を算出した結果、アスファルトの性状試験から推定した S_{bit} と DSR 試験から求めた複素せん断弾性率から推定したアスコンのスティフネスは同程度の値であったため、許容 49 kN 換算輪数も絶対値は異なるが、同じような傾向であった。複素せん断弾性率より求めた安定処理混合物のスティフネスは全体的に高い値であったため、許容 49 kN 換算輪数は小さい値であった。
- (4) AI で提案されている式を用いて許容 49 kN 換算輪数を算出した結果、舗装設計便覧で示される式とは傾向が大きく異なるものであった。これは、舗装設計便覧と比較し、アスコンの飽和度の影響が高いためと考えられる。
- (5) MEPDG では、一部で舗装設計便覧と同様な傾向を示していたが、ひび割れ箇所との明確な相関は見られなかった。
- (6) 開削されたアスコンの底面にて生じているひび割れ箇所と許容 49 kN 換算輪数を算出し

た結果、舗装設計便覧で示される式により算出した許容 49kN 換算輪数が高い数値となったのは、底面でひび割れが見られなかった 121 工区 (No.2) と比較的ひび割れの少なかった姨捨工区 (No.13) であった。このことからアスコン層底部で生じているひび割れの大小と許容 49 kN 換算輪数が高かった箇所が概ね一致している結果であった。

第5章では、

- (1) WT 疲労試験により、アスコンのタイヤ走行部直下に、走行方向と同一方向の縦表面ひび割れを発生させることができた。
- (2) 試験温度が高い、あるいは接地圧が高い場合は、タイヤ走行部の端部においても縦表面ひび割れが生じる場合がある。この原因は、タイヤ荷重によって供試体表面にせん断作用が生じたことによると考えられる。
- (3) 縦表面ひび割れが生じた原因について検討するため、アスコンに圧縮側と引張側のそれぞれで繰り返し载荷を行う Push-pull 試験の結果、両方の条件においてアスコンは瞬時に応力が緩和してしまい、引張側でも圧縮応力が、圧縮側でも引張応力が生じる。
- (4) 円柱状のアスコンに 600×10^{-6} のひずみを圧縮作用、あるいは引張作用を周波数 1 Hz で繰り返し与えた結果、同一形状のひび割れが生じた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご懇切なるご指導とご助言を賜った中央大学理工学部都市環境学科教授 姫野賢治先生には心より御礼を申し上げます。

長岡技術科学大学環境社会基盤工学専攻教授 高橋修先生には、私が中央大学大学院理工学研究科に入学するより以前から、貴重なアドバイスやご指導賜るとともに、本論文の審査も快くお引き受けいただき、心より感謝する次第であります。また、中央大学理工学部精密機械工学科教授 辻知章先生、中央大学理工学部都市環境学科教授 大下英吉先生、同学科准教授 平川大貴先生には、ご多忙の折、本論文の審査をお引き受けいただきましたことに甚大なる感謝の意を表します。

本論文は、著者が平成26年に中央大学大学院理工学研究科博士後期課程に入学してから今日までの3年間に行った研究の成果を取り纏めたものです。この間、学生生活、各種実験あるいはゼミ合宿などを通じてご協力とお気遣い頂いた姫野研究室の学生あるいは卒業生には厚く御礼申し上げます。本論文の主要な研究となった高速道路の貴重なデータを快く提供していただいた株式会社高速道路総合技術研究所 舗装研究室室長 高橋茂樹氏には心よりお礼申し上げます。また、高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクトに参加させていただき、関係各位には大変お世話になりました。

著者が所属している東亜道路工業株式会社の元代表取締役社長 吉原健一氏には、中央大学大学院への入学の機会を与えていただくとともに、温かい叱咤激励を頂きました。心より感謝の意を表します。同技術本部技術部の皆様には、博士課程に入学して以来常に励ましの言葉を頂いてまいりました。同研究所所長 村山雅人氏には、著者が入社してからこれまで公私ともにご指導いただきましたことに、心より感謝申し上げますとともに、今後ともよろしくご指導賜りたく存じます。

株式会社奥村組 前川亮太氏、東洋大学助教 久保寺貴彦先生、日本道路株式会社 遠藤

謝 辞

桂氏，株式会社 NIPPO 向後憲一氏をはじめ道路研究室の先輩諸氏におかれましては，貴重なアドバイスとご声援を頂きました．皆様の研究への姿勢と志の高さに幾度となく励まされました．心より感謝申し上げます．また，長岡技術科学大学 交通工学研究室の学生および卒業生の皆様ならびに東亜道路工業株式会社 技術研究所所員各位には，快く実験の手伝いを引き受けて頂き，誠にありがとうございました．

最後に本研究に専念できるように著者の日常を支えてくれた家族に感謝します．

頓 首