

中央大学博士論文

長期供用劣化がアスファルトの粘弾性状に及ぼす
影響に関する研究

平戸 利明

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
都市環境学専攻

平成28年度

2017年3月

目 次

第1章 総論	1
1. 1 研究の背景	3
1. 2 既往の研究と本研究の位置づけ	10
1. 2. 1 アスファルトの粘弾性状とアスファルト舗装の破損	10
1. 2. 2 アスファルト舗装の縦表面ひび割れの発生要因と そのメカニズムについて	13
1. 3 本研究の概要	17
第1章の参考文献	21
第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果	31
2. 1 緒言	33
2. 2 調査箇所の概要	34
2. 3 実験方法	37
2. 4 試料の調整方法	38
2. 5 アスコンの品質評価方法	42
2. 6 回収アスファルトの評価方法	42
2. 7 アスファルト性状の評価方法	43
2. 7. 1 一般的な性状評価方法	43
2. 7. 2 赤外分光分析の解析方法	43

2. 7. 3	アスファルトのスティフネスの測定方法	45
(1)	ノモグラフによるアスファルトのスティフネスの推定	45
(2)	レオメータによるスティフネスの測定	46
2. 7. 4	組成分析方法	52
2. 8	混合物の品質試験結果	54
(1)	抽出後の骨材粒度の調査結果	54
(2)	アスファルト量の調査結果	58
(3)	密度試験結果	60
2. 9	アスファルトの粘弾性状試験結果	62
(1)	アスファルト舗装の深さ方向における針入度	62
(2)	供用年数と針入度の関係	65
(3)	赤外分光分析によるアスファルトの劣化評価	67
(4)	針入度と伸度，軟化点の関係について	69
(5)	アスファルトのスティフネスの測定結果	71
(6)	組成分析結果	74
2. 10	第2章のまとめ	76
	第2章の参考文献	78
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	81
3. 1	緒言	83
3. 2	促進劣化方法	84
3. 2. 1	混合物を用いた促進劣化方法	84

3. 2. 2	バインダ単体の促進劣化方法	86
3. 3	使用材料	86
(1)	バインダ性状	86
(2)	混合物の概要	87
3. 4	評価結果	88
3. 4. 1	促進劣化試験後のバインダ性状試験結果	88
3. 4. 2	バインダ単体の促進劣化による評価結果	90
(1)	針入度および吸光度による比較	90
(2)	アスファルトのスティフネスの評価結果	93
3. 5	現場から採取した試料との比較	96
3. 6	第3章のまとめ	103
	第3章の参考文献	105

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	107
4. 1	緒言	109
4. 2	解析方法	111
(1)	アスコンのスティフネスの推定方法	111
(2)	アスファルト舗装の許容 49kN 換算輪数の算出方法	112
4. 3	評価結果	114
(1)	アスコンのスティフネスの推定結果	114
(2)	許容 49kN 換算輪数の算出結果	122

4. 4	第4章のまとめ	131
	第4章の参考文献	132
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	135
5. 1	緒言	137
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	138
5. 2. 1	試験概要	138
5. 2. 2	試験条件の選定	141
5. 2. 3	供試体に生じるひずみの測定	145
(1)	供試体表面と底部のひずみの測定方法	145
(2)	測定結果	146
5. 3	応力緩和性能の評価	149
(1)	試験方法	150
(2)	試験結果	150
5. 4	Push-Pull 試験による応力の評価	152
5. 4. 1	評価方法	152
5. 4. 2	評価結果	154
(1)	セメントコンクリート供試体を用いた評価結果	154
(2)	アスコン供試体を用いた評価結果	154
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	159
5. 6	第5章のまとめ	161
	第5章の参考文献	162

第6章 結 論 165

謝 辞 172

第1章 総論

第1章 総論

1. 1 研究の背景

各国の社会資本整備は、その国の歩んだ歴史の中で、経済の発展あるいはその文化に歩調を合わせて、環境あるいは景観との調和に基づき整備されている。特に、人や車両が通行する道路は誰しもが利用する最も身近な社会資本である。一般的な道路舗装として、アスファルトコンクリート舗装やセメントコンクリート舗装があるが、このほかにも景観性を重視したブロック舗装やタイル舗装など多種多様な舗装材料が利用されている。

わが国において、経済活動の動脈として整備がすすめられた道路の整備率は、1954年（昭和29年）から始まった第1次道路整備五箇年計画を通じ飛躍的に向上した。同時期に石油産業の発展にともない、道路舗装に用いられるアスファルトの生産量が増加したこと、そして大規模な舗装工事にも対応できるようにアスファルト混合物（以下、アスコン）の生産設備が全国各地で建設されたことにより、1999年の道路総延長は90万キロに迫るものであった [1]。

アスファルト舗装は、着々とその延長を延ばしていたが、車両の保有台数の伸びがそれをはるかに上回り、ひび割れやわだち掘れといった損傷が1960年代ごろから課題となっていた [1]。これらの対策のため、アスコンの粒度や配合設計方法が検討されてきた [2] [3]。

Eppsらは、骨材粒度の違いによる応力-ひずみ曲線を計測し、細粒になればなるほど、引張強度や破壊時のひずみが大きくなることから、ひび割れ抑制効果が高くなることを述べている [4]。わだち掘れ対策では、骨材粒度やアスファルト量の調整だけではなく、材料面からのアプローチも行われるようになり、その一つの取り組みとして改質アスファルトの利用がある [5]。道路舗装への改質アスファルトの利用としては、1898年にフランスでアスファルトにゴム添加が試行されている。以降、英国、オランダ、米国でも検討された。わが国の改質アスファルトの研究は、1950年代（昭和20年代）に路面の荒れ（骨材飛散）、ひび割れなどの破損に対する対策として試行されている [6]。その後1988年に発刊された

第1章 総論

アスファルト舗装要綱（昭和63年度版）において、改質アスファルトの標準的性状が設けられ、一般材料として扱われるようになった [7]。1980年代後半には、走行安全性を目的として、排水性舗装が多く利用されるようになり、耐久性を高めるための高粘度改質アスファルト（現ポリマー改質アスファルトH型）が開発された [8]。

また、舗装技術は、耐久性の向上のみならず環境負荷軽減技術についても取り組みがなされている。その一つとして、地球温暖化ガスを抑制することのできる中温化技術がある。中温化技術は1990年台に開発され、試行されていたが、2005年2月に京都議定書が発効され、中温化技術がますます注目されるようになった。この中温化技術は、日本よりも欧米で多くの施工実績を重ねている [9] [10] [11]。中温化技術は、アスコン製造時における地球温暖化ガスの抑制以外にも様々な効果が期待される。アスコンの製造時の加熱温度がおよぼすアスコンの品質への影響について研究されており、過加熱がもたらすアスコンの品質の低下が指摘され、中温化技術によるアスファルト混合物の高耐久化について検討されている [12] [13]。

2000年以降では、新規な投資ウェイトは抑制され、本格的な道路の維持修繕の時代を迎えている。厳しい財政事情のもと公共事業のコスト縮減や維持管理の効率化が強く求められており、道路舗装に於いても既存ストックの有効利用技術の促進あるいは長寿命化など様々な取り組みが行われている。維持修繕時代となり、アスコンの出荷量が低下しても、改質アスファルトの有効性は認識され、図-1.1に示すとおり、その需要は一定の割合で推移している [14] [15] [16]。改質アスファルトの開発当初の利用目的は、耐流動性や耐摩耗性の向上であったが、近年では、改質アスファルトを用いたことによるアスファルト舗装の長寿命化について評価されている。丸山らは、アスファルト舗装の調査結果に基づきライフサイクルコストを算出しており、ストレートアスファルト（以下、ストアス）を用いた混合物と比較し、ポリマー改質アスファルトII型（以下、改質II型）を用いた混合物は、維持管理指数（Maintenance Control Index : MCI）により評価すれば、概ね1.8倍程度長寿命であ

ると評価している [17] .

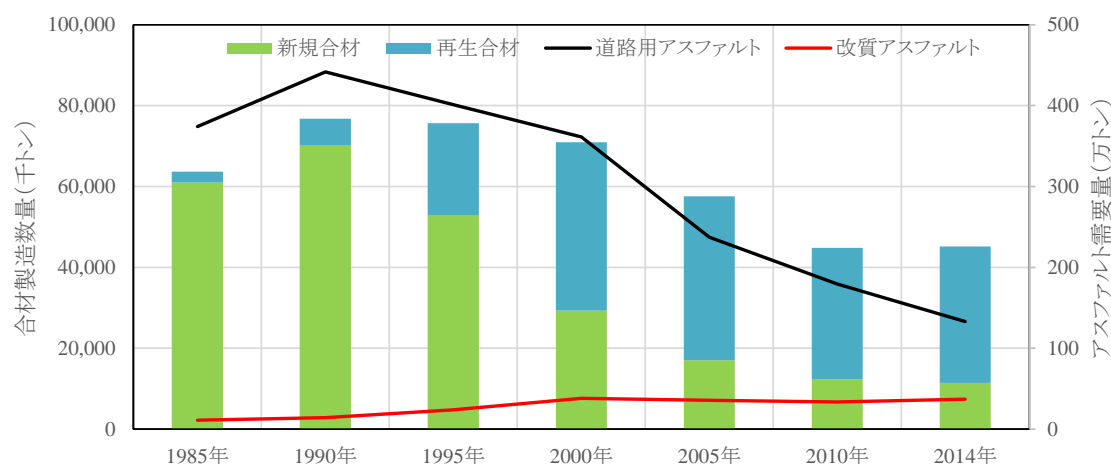


図-1.1 合材製造数量とアスファルト需要量の関係

既存の道路ストックを有効利用する技術として、アスファルトの再生技術についても、舗装発生材処分場の確保が困難となったことを受け、1991年（平成3年）にアスファルトコンクリート塊の再資源化施設への搬出と、再生加熱アスコンの使用が原則化された。その後再生技術について検討された結果、我が国のアスファルトコンクリート塊の再資源化率は98%以上となり、高い再資源化率となっている [18] [19]。このように、舗装技術は、その時代の舗装に生じる問題に対応するように改良されてきた。これらの研究の中には、アスファルトに代わる舗装材料の開発についても取り組みがなされているが [20]、未だ確立されず、アスファルトの繰返し再生利用が主要な技術となっている。

アスファルトは、化石燃料である原油を減圧蒸留することで生産される。アスファルトの品質は、輸入原油種、製造方法に影響を受けるため、全国から収集したストアスについて建設省土木研究所（現国立研究開発法人土木研究所）が1985年（昭和60年）から1986年（昭和61年）にわたり品質変化について調査し、アスファルト舗装技術委員会品質試験法分科会で解析されている [21] [22] [23] [24]。この結果では、調査された期間においてアスファルトの品質変化は収束しているとされている。これは、生産用の処理原油ならびに

製造方法の画一化によるものとしているが、近年では、アスファルトを海外から輸入するケースも増えており、今後のアスファルトの再生利用への影響については再度調査する必要があるものと考えられる [25].

アスファルト舗装に用いられるアスコンは、供用されるまえにも様々な劣化要因がある。図-1.2はアスファルトの性状変化の要因と寿命予測の捉え方を表したものである。使用する材料の初期特性により、供用寿命を推定することができれば、簡易にかつ精度よく評価することが可能となるが、製造工程や施工工程を経て、さらに交通車両による繰返し載荷、あるいは熱や酸化による化学変化や雨水による剥離などの環境負荷が加わることで、アスファルトの性状が大きく変化することが予想される。このように様々な環境条件や交通条件に暴露されるアスファルト舗装の寿命を一様に予測することは難しい。このため、製造時、貯蔵時、施工時のアスファルトの性状変化あるいは疲労状態や環境負荷に分けて個別に研究されてきた [26] [27] [28]. 近年では締め固めたアスコンを用いた促進劣化試験が可能となり、環境負荷を組み合わせた検討もなされている [29] [30].

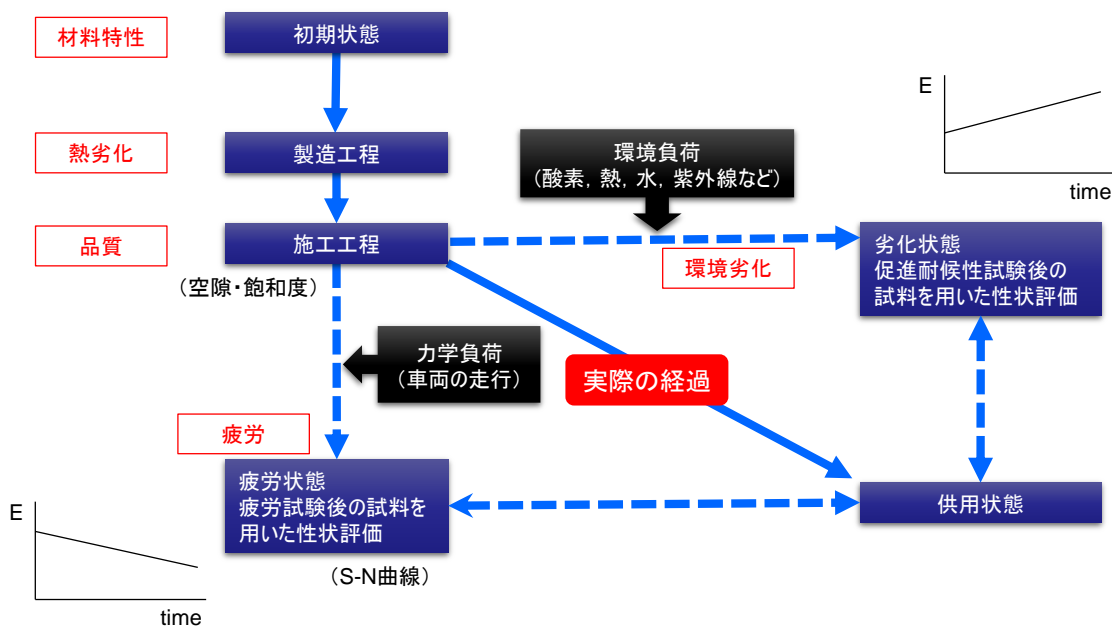


図-1.2 アスファルトの性状変化の要因と寿命予測の捉え方

第1章 総論

アスファルトの貯蔵中や製造・運搬時の劣化評価試験として、蒸発量試験、蒸発後針入度試験あるいは薄膜加熱試験などがある。蒸発量試験や蒸発後針入度試験では、貯蔵しているアスファルトから揮発性成分が蒸発することに伴うアスファルトの性状変化を評価するものである [31]。しかし、アスファルトの変質の大部分は、アスファルトが加熱骨材の表面に薄い被膜となって存在し、空気に触れる度合いの大きい加熱混合時に生じるものと考えられている [32] [33] [34]。通常のアスファルトでは蒸発量試験の測定値は 0.3 %以下、蒸発後の針入度も 80 %以上の値とされているため、これらの試験はアスファルトの品質試験的な意味合いが強い。一方、薄膜加熱試験 (Thin Film Oven Test : TFOT) では、アスファルトの試料厚さが 3 mm 程度で 163°C で 5 時間加熱することにより、アスファルトプラントにてアスコンを製造する際にアスファルトが受ける加熱劣化を再現することができる [32] [33] [34] [35]。これに対し、米国カリフォルニア州の道路局で開発された回転式薄膜加熱試験 (Rolling Thin Film Oven Test : RTFOT) は、膜厚 5~10 μm 程度で流動する試料に対し、常に新しい熱風を吹き込み、アスファルトの硬化を促進するものであり、5 時間加熱する TFOT と比較し、RTFOT では 75 分に促進時間が短縮された [36]。これらの試験によりアスファルトの劣化を促進することができるが、加熱劣化では、供用されているアスファルトの化学組成を必ずしも再現することができないと考えられている [24]。

1982 年に、Federal Highway Administration (FHWA) が、道路の設計、管理、保全技術の向上を目的として National Research Council (NRC) の下に設置した Strategic Highway Research Program (SHRP) の中で「アスファルト」に関する取り組みが行われた。それまでアスファルトの選定には、針入度や軟化点などの物理性状が用いられてきたが、舗装用バインダの新しい仕様及び配合設計方法である Superior Performance Pavement (SUPERPAVE) では、実際の現場におけるパフォーマンスと直接関係のある粘弾性を基本とする Performance Grade (PG) と呼ばれる指標が設定され、実際に供用される地域の

第1章 総論

舗装体温度によってバインダが決定されることとなった [37]. 特性の評価には、レオロジー的測定と劣化試験が組み込まれている。供用後のアスファルトを再現する促進劣化方法では Pressure Aging Vessel (PAV) が採用され、PAV 後のアスファルトについて Dynamic Shear Rheometer test (DSR) あるいは Bending Beam Rheometer test (BBR) を行うことで供用後のアスファルトの性能を推定している [38] [39] [40]. これらのレオロジー的測定により、製造時や供用後の劣化も含めたアスファルトの性状を性能規格として取り扱っている。これらの試験はストアスを対象に設定したものであり、改質アスファルトなどストアスよりも粘度の高いバインダについては、相関関係が低いことが指摘されている [41]. その原因の一つとして RTFOT の劣化手段が改質アスファルトに適していないことが挙げられている [41] [42].

ヨーロッパにおいては、1999 年に The European Committee for Standardization (CEN) により、舗装用アスファルトのための標準規格として「EN12591」が制定されている。その後、米国同様に、室内試験により、供用後のアスファルトの性能を把握する方法について研究されており、短期劣化と長期劣化に分けて促進劣化方法や促進劣化させたバインダに対する新たな試験方法が提案されている [43]. このように、アスファルト舗装に用いられるバインダの品質は、材料特性から製造、施工そして供用と進むことで変化するため、その変化を原油種による違い、改質や非改質の違いあるいは供用されたアスファルト舗装より採取した試料や室内試験により促進劣化させた試料の違いに関わらず、一律に評価できる指標が各国で検討されている。

アスファルトは、劣化すると一般的に針入度や伸度が減少し、軟化点が上昇する。特に問題とされるのは、針入度が極端に低下してアスコンがもろくなり、安定性が低下する場合と考えられている [5] [44] [45] [46]. アスコンとして再利用する場合に、再生骨材中に含まれるアスファルトの針入度が 20 (1/10 mm) 以上であることが要求性能として定められている [19]. これは、本州で通常用いられている針入度 60-80 を用いた結果である。針入

第1章 総論

度 80-100 のアスファルトが一般的に用いられている北海道においても同様な研究がなされているが、室内試験ではあるが、ここでもやはり針入度 20 (1/10 mm) 以下で繰返しリサイクルを行った場合、アスファルトの品質が不安定となることが報告されている [47].

アスコンにはわずか 5%程度しかアスファルトは含まれていないが、その力学的特性はアスファルトの性状に大きく依存する。このような特性を持つアスファルトを繰返し再利用しているが、再生されたアスファルトと新規アスファルトの性能の違いあるいはその供用性能などは未知な部分が多い。

アスファルトの供用による劣化については、1967 年 (昭和 42 年) に国道 16 号線幕張地区で行われた幕張試験舗装にて調査されている [48] [49] [50] [51]. ここでは、実路で供用された舗装について、表層混合物のアスファルトの性状と舗装の破損について検証され、残留針入度が 40 以下、または 15°C 伸度が 10 cm 以下になった場合に、ひび割れ率が急速に増加するが、アスファルト量の変化や混合物種類の違いを考慮すると伸度が 10cm 以下になっても舗装のひび割れは必ずしも発生するとは限らないことが述べられている。また、新たなアスコンの破壊形態として、車両の通過位置で舗装表面に生じた縦ひび割れについても言及されている。調査時点ではひび割れは基層部にまで達していない。このひび割れの発生要因は、舗装表面に生じた引張応力としているが、引張応力が生じた原因については明らかになっていない [52] [53]. 縦ひび割れが生じた時期が、試験施工として施工した僅か 2 年後であるため、アスファルトの劣化としては早期である。このようなアスファルト舗装表面に生じるとアスファルトの粘弾性状との相関については調査する必要がある。

近年では、北海道苫小牧市美沢地区の国道 36 号にて試験道路が構築され、大規模な開削調査が継続的に行われている。丸山らは、開削調査により得られたデータに基づいてアスファルト舗装の疲労寿命予測と力学的設計法に関する研究成果をまとめている [54]. この研究の中では、アスコンの疲労試験や FWD によるたわみ量調査などがおこなわれているが、バインダの性状変化には言及していない。実際に供用されたアスファルト舗装から試料を

採取し、アスファルトの性状変化を深く理解することで、今後も安定してアスファルト舗装を再生利用する技術を確立する意義は高い。

1. 2 既往の研究と本研究の位置づけ

1. 2. 1 アスファルトの粘弾性状とアスファルト舗装の破損

粘弾性状を示すアスコンは、温度や載荷時間によってその挙動が大きく異なる。アスコンの場合、載荷により発生する応力とそれに伴うひずみの比がスティフネスであり、ある条件で測定したスティフネスを弾性係数として用いられる [55]。アスファルト舗装の設計には、経験的設計法と理論設計法がある。理論設計法では、流動変形については路床上部の変形を含めた多層構造により評価し、ひび割れについてはアスコン下面の引張ひずみに着目しその疲労破壊回数を解析している。アスコンのスティフネスは、間接引張試験や繰返し載荷試験などにより、アスコンのスティフネスを評価しているおり [26] [56]、一般的な範囲として示されている [57]。評価するアスコンの寸法や載荷方法にも、スティフネスの値は大きく依存することから、実際の道路舗装で利用されているアスコンの挙動を解析する場合、解析方法により結果が大きく異なることが指摘されている [58]。特にアスコンが低スティフネス状態で生じる破壊について解析するため、高温時のアスコンのスティフネスの評価方法についても検討されている。久利らは、試験する供試体の寸法による影響やひずみの測定方法を考慮し、特に評価の難しい高温時におけるアスコンのスティフネスを静的試験と動的試験にて測定する方法について実験を行い、高温時のアスコンのスティフネスの評価方法を提案している [58]。しかしながら、低温から高温までのアスコンのスティフネスを評価する方法はまだ確立されていない。

一方で、アスファルトのスティフネスについても古くから研究されており、Heukelom [59] は応力 σ とひずみ ε からアスファルトのスティフネス S_{bit} を 1.1 式により定義し、載荷時間 t と温度 T の関数で示した。

$$S_{bit} = \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)_{t,T} \quad (1.1)$$

Van Der Poel [60] は針入度，軟化点，*Penetration Index (PI)*，任意の荷重時間および温度からアスファルトのスティフネスを推定するノモグラフを作成している。

このほかにも粘弾性測定にはいくつかの測定方法があるが，牛尾 [61] は，スライディングプレートレオメータあるいは円筒型粘度計によりアスファルトのスティフネスを測定し，ノモグラフより得られるスティフネスとの相関を検討している。SHRP では2つの平行円盤にサンプルを挟んで測定する DSR 試験による方法を選定している。DSR 試験から得られる物理量の一つとして複素弾性率がある。道路用語辞典によれば，複素弾性率とは，アスファルトのような粘弾性的な挙動を示す材料に周期的な荷重による変形を加えた場合，応力はひずみに対するずれをもって周期的に変化する。この場合の最大応力を最大ひずみで除した値とされている [62]。DSR 試験により様々な荷重条件や試験温度により精度よく，アスファルトのせん断弾性率として測定することができる。

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 [60] 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 [63] [64] [65] [66]。Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (以下，MEPDG) では，アスファルトの粘度，混合物の粒度，容積特性からアスコンの動弾性係数を推定している [66]。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 [67]。

既往の研究では，繰返し荷重を受けることでアスコンのスティフネスは低下するが [26]，一方でアスコンに含まれるアスファルトが劣化することにより，その針入度が低下し，スティフネスが高くなることが述べられている [68]。実際の道路舗装では供用される環境に応じ，これらが複合して作用し，アスファルト舗装の寿命に大きく影響をおよぼすものと考えられる。

アスファルト舗装の設計では，初期の材料特性を評価し，製造から舗設までの施工を含め

第1章 総論

たものとなっている。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，あるいは気象条件に伴う酸化劣化による硬化により生じるものと考えられている [49] [69]。既往の研究 [70] [71] から，アスファルトの劣化は，表面のみならず，深さ方向にも進行しており，特にアスファルト舗装表面付近が，気象劣化の影響を受けやすいことが述べられている。これまでのアスファルト舗装では，表層や基層など比較的上部の舗装を修繕することで対応してきたが，近年では，深層部まで損傷が及んでいるケースが増えている [72] [73]。高速道路のアスファルト舗装では 20 cm 程度のアスコンを構築しており，深層部のアスファルトの劣化がどの程度進行しているのか詳しく調査された例はない。

第 2 章では，長期供用された高速道路で使用されていたアスファルトについて調査した結果について述べている。ここでは，交通履歴や補修履歴が明確な高速道路にて，厚さが 15cm 以上のアスコン層から，舗装損傷の有無，供用年数，車輪通過の有無あるいは混合物の種類などに分けてブロック状の試料を採取した。その後，ブロック状の供試体を表層，基層，アスファルト安定処理層について，各混合物に含まれるバインダ性状を調査した [74] [75] [76] [77]。アスファルトは，既設舗装からアスコン層をブロックで採取し，表層，基層，アスファルト安定処理層にそれぞれ切断し，そこから抽出回収した。抽出したアスファルトについて性状試験を行い，アスファルトの劣化状況を把握した。上述したように，アスファルトの劣化評価はアスファルト舗装に生じるひび割れと相関の高い針入度が一般的な指標となっている。山口らは，ポリマー改質アスファルトの劣化防止としてカーボンブラックの有効性を示しているが [78]，ストアスの針入度の低下を抑制する手段はいまだ解明されていない。既往の研究では，ポリマー改質アスファルトの劣化進行は，ストアスと比較し緩やかであることも報告されている [79]。ポリマー改質アスファルトは未劣化の状態と比較的針入度が低いため，針入度によりストアスと同様に評価することは難しい [19]。

そこで，第 3 章では，室内試験により条件を変えて促進劣化したバインダについて同様

の性状試験を行い、アスファルトの劣化に影響を及ぼす因子を検討した。さらに、室内試験により促進劣化させた試料と現道から採取したアスファルトを比較することにより劣化の影響について考察し、供用されたアスファルトの粘弾性状の評価方法について検討した [80]。その結果、複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係は、19年前のアスファルトと現在のアスファルトとの違い、促進劣化させた試料と現道から採取した試料の違いあるいは改質アスファルトとアスファルトの違いに依存しないことが分かった。

第4章では、長期供用されたアスファルト舗装に含まれるアスファルトの粘弾性状とアスファルト舗装の破損との関連性について明らかにするとともに供用後のアスファルトの性状と舗装の破損を理論設計にあてはめ、その適用性について検証した。

1. 2. 2 アスファルト舗装の縦表面ひび割れの発生要因とそのメカニズムについて

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ひび割れがある。この現象はセメントコンクリート舗装における一般的な損傷には見られない [81]。

縦ひび割れは、トップダウンクラックあるいはわだち割れとも呼ばれ、おもに舗装表面から発生し、底部へ進行するものとされている。本現象は、舗装厚が薄いもののみならず、厚い高速道路においても生じるとされている [82]。この原因については、タイヤ端部に発生する引張ひずみに起因するもの、あるいは走行車両による曲げ作用により走行軌跡部とは異なる位置で発生することが既往の研究で述べられている [83] [84] [85]。

図-1.3は National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) で報告されているアスファルト舗装の縦表面ひび割れの発生場所とその発生原因に関する概略である [83]。ここで示されるとおり、タイヤ端部の引張ひずみから生じるひび割れ、あるいは走行軌跡部以外の場所において、曲げ作用によるひび割れが着目されている。

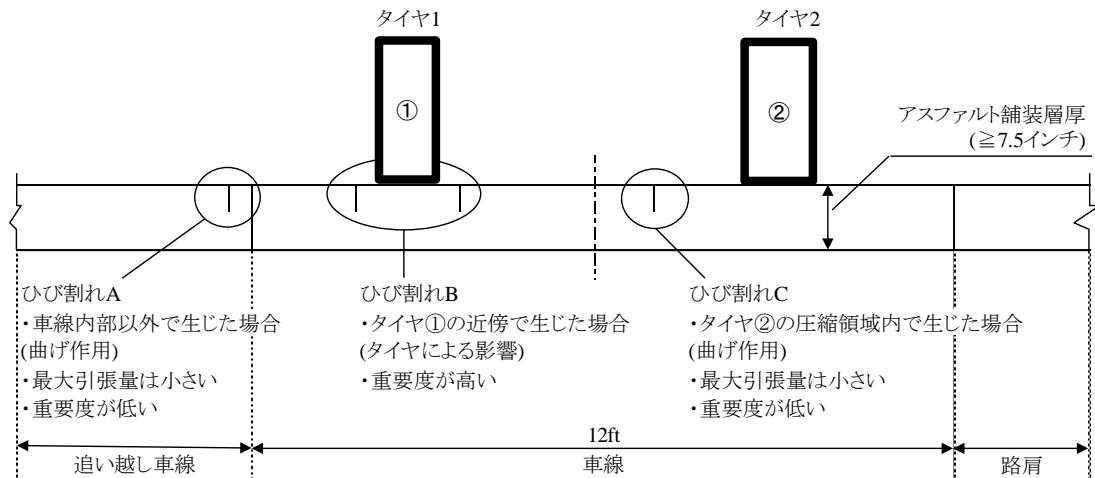


図-1.3 表面ひび割れの発生位置とその原因の概要

アスファルト舗装の構造は、アスコン層下面の引張ひずみによる疲労ひび割れに基づいて、設計されているが、上述したように、ひび割れにはアスファルト舗装の上面から生じるものもあり、これは設計に反映されていない [86].

表-1.1 は、TOP-DOWN CRACKING について調査された一例を示す [87] [88] [89] [90] [91] [92] [93]. これらのひび割れは世界各国の共通の課題である. 表面ひび割れの発生時期は 10 年以内に生じるケースが多いようである.

太陽光がさえぎられる場所では縦表面ひび割れが生じにくいことも既往の研究で報告されており、縦表面ひび割れと舗装路面の温度による影響についても研究されている [94] [95].

車線において車両は走行レーンに従い走行しているものの必ずしも同一箇所を通過していないため、縦表面ひび割れの発生位置を特定することは難しいが、車両のタイヤ直下においてもひび割れが生じているように見える箇所もあり、必ずしもタイヤ端部のみで発生しているものではないと考えられる.

表一.1.1 各国におけるトップダウンクラックの発生時期の調査結果

場所	状況
フランス	舗設後3年から5年以内にトップダウンクラックが発生
イギリス	舗装厚180mm以上のアスファルト舗装では、10年以内にトップダウンクラックが生じる
オランダ	舗装厚160mm以上のアスファルト舗装にてトップダウンクラックが生じる
日本	舗設後1年から5年以内にトップダウンクラックが発生
カリフォルニア州	調査の結果、トラックタイヤのエッジにかかる応力による高い引張ひずみが原因となりトップダウンクラックが発生する
ワシントン州	舗装厚160mm以上のアスファルト舗装で、3年から8年以内にトップダウンクラックが生じる
フロリダ州	様々な厚さのアスファルト舗装にて舗設後、5年から10年以内にトップダウンクラックが生じる

そこで、縦表面ひび割れの発生メカニズムを明確にし、このひび割れも含めた設計方法を提案することを目的とし、第5章では、縦表面ひび割れの発生しやすい位置や発生条件について室内試験により検証し、そのメカニズムについて検討した。

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試験機 [96] [97] や繰返し載荷試験 [98] [99] を用いる方法あるいは理論解析 [85] [100] [101] 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、タイヤ端部に生じるひび割れについて着目されており、タイヤ直下に発生するひび割れについての詳細な検討はなされていない。

本研究では、アスファルト舗装の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ホイールトラッキング供試体を設置し、そのうえで走行試験を行った。この結果、試験温度を 40℃、接地圧を 0.67 MPa に設定することで、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。さらに本現象について原因を究明するために、車輪走行面と供試体の底面にひずみゲージを設置し、ひずみの測定を行った。これら

第1章 総論

の検討結果を受けて、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、引張作用を受けるとひび割れが生じやすいのではないかと仮定した。そこで、アスコンを一度圧縮させたのちに引張試験を行い、その強度変化について検討した [102]。その結果、アスコンは圧縮作用を与えると直ちに応力緩和するため、圧縮作用を繰り返しても、アスコン内部には引張応力が生じることが明らかとなった。言い換えると、アスコンは繰り返し圧縮作用を受けても疲労ひび割れが生じることが分かった。

第1章 総論

1.3 本研究の概要

本研究の最終的な目的は、「アスファルトの粘弾性状とアスコンの破壊について関連性を見出すこと、ならびにアスファルトの粘弾性状を統一的に評価できる指標を提案すること」である。本研究では、アスファルトの粘弾性状に着目しアスファルト舗装の破損について2つアプローチを行った。

一つは、高速道路で長期供用されたアスファルト舗装から抽出回収したアスファルトについて常温域から高温域の粘弾性状を測定した。さらに、室内試験により促進劣化させた試料と現道から採取したアスファルトを比較することにより、アスコンの損傷とアスファルトの粘弾性状の関連性について考察し、供用されたアスファルトの評価方法の確立を目指した。二つ目に、アスファルト舗装の損傷には、舗装表面から生じる縦ひび割れがある。この現象は、弾性解析では、説明がつかない破損であるため、理論設計法に反映されていない。そこで、アスファルトが示す粘弾性状の特徴の一つである応力緩和性能に着目し、弾性体に近いセメントコンクリートでは生じない、縦表面ひび割れの発生メカニズムとその要因について検討した。

各章の概要を以下に述べる。

第1章 総論

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

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

第5章 応力緩和に着目したの発生メカニズムとその要因に関する研究

第6章 結論

第1章 総論

本研究の背景について説明し、関連する既往の研究を概観し、残された課題を整理することで、本研究の目的を設定した経緯について述べている。

第1章 総論

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

第2章では、東日本高速道路株式会社が管理する高速道路において、舗装の開削調査を行い、アスファルト舗装の表面から深さ方向への劣化の影響度を調査した。

本調査の結果から、アスファルト舗装の劣化は表面のみならず、アスファルト安定処理路盤にも及んでいること、ポーラス混合物では密粒度アスコンと比較し、針入度の低下が著しく速いことが確認された。

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章では、第2章で得られたデータを踏まえて、室内試験により促進劣化試験させたバインダとの比較検証を行った。

室内試験の結果、実際の道路で生じているアスファルトの劣化をシミュレートするためには、バインダ単体を劣化させるだけでなく、使用する混合物の配合を考慮した促進劣化試験を行う必要があることを示した。さらに、交通荷重や環境負荷により劣化したアスファルトの粘弾性状とアスファルト舗装の破損の関係を整理したところ、両者の間に高い相関があることを示した。

また、アスファルトの粘弾性状としてノモグラフから得られるスティフネスと Dynamic Shear Rheometer (DSR) 試験から得られる各種パラメータを用いて評価した結果、ノモグラフから得られるスティフネスと DSR 試験より得られる複素せん断弾性率には、载荷時間や測定温度に関わらず、非常に高い相関があることを示した。

さらに、DSR 試験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、バインダの種類、载荷時間、測定温度あるいは現道から採取したアスファルトと促進劣化させたアスファルトに関わらず、非常に高い相関が得られることが分かった。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 49kN 換算輪数とアスコンの疲労

第1章 総論

ひび割れに関する研究

第4章では、アスファルトの粘弾性状とそれを用いた理論設計法によるアスファルト舗装の寿命解析を行い、その適用性について検討した。長期供用されたアスコンから採取したアスファルトのスティフネスを用いて、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 49 kN 換算輪数を算出した。許容 49 kN 換算輪数の算出方法はいくつか提案されているが、舗装設計便覧に示される方法で算出した結果、アスコンのひび割れと一定の相関が見られた。

第5章 応力緩和に着目したの発生メカニズムとその要因に関する研究

第5章では、アスファルト舗装の表面に生じる縦ひび割れに着目し、ホイールトラッキング試験を改良して、供試体表面に縦ひび割れを再現することで、そのメカニズムについて検討した。試験の結果、ある条件下で、タイヤ直下の表面にひび割れが生じることが分かった。この要因を明らかにするため、アスコンに圧縮作用と引張作用をそれぞれ繰り返して与え、応力の変化を評価した結果、弾性体に近いセメントコンクリートでは、圧縮作用時には圧縮応力、引張作用時には引張応力がそれぞれ生じるが、アスコンでは、応力緩和するため、作用方向に関わらず圧縮応力と引張応力が交互に生じる。このことから、アスコンでは、繰り返して圧縮作用を受ける車両走行位置の舗装表面において、ひび割れが生じる可能性があることが明らかとなった。

第6章 結論

第6章では、本研究で得られた成果について総括している。

第1章 総論

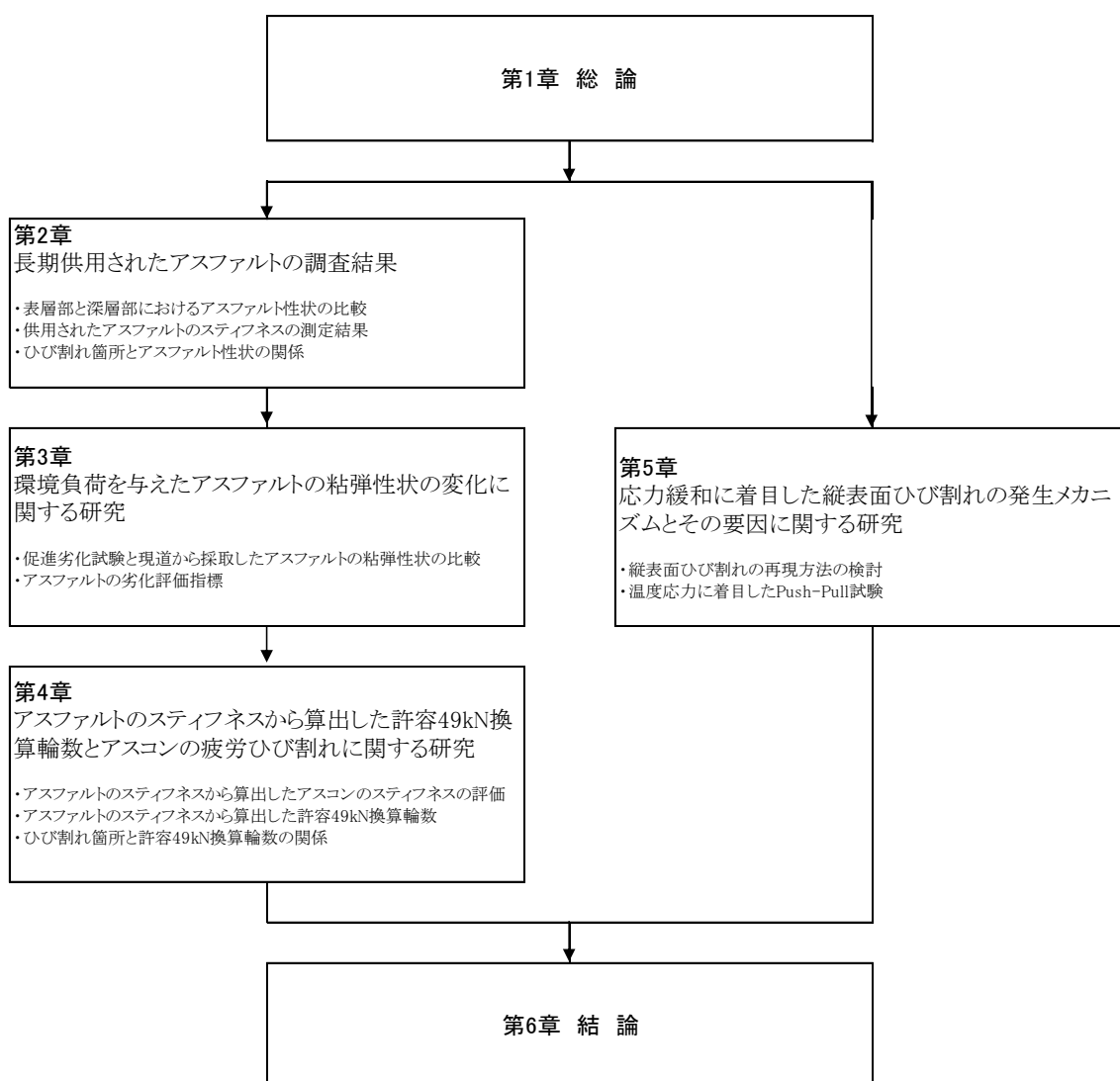


図-1.4 研究フロー

第1章の参考文献

- [1] 多田宏行：語り継ぐ舗装技術-道路舗装の設計・施工・保全-, 鹿島出版会, 2000.
- [2] 松野三朗, 谷本誠一：アスファルト混合物の配合とその供用性-主として幕張試験舗装の観測結果-, 土木技術資料, Vol.13, No.3, pp.11-17, 1971.
- [3] 阿部頼政：アスファルト混合物の諸性質と配合設計, アスファルト, No.100, 1975.
- [4] J. A. Epps et al : Influence of Mixture Variables on the Direct Tensile Properties of Asphalt Concrete, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.39, P207, 1970.
- [5] 菅原照雄：アスファルト混合物の物性, 土木学会論文集, 第348号, V-1, pp.27-36, 1984.8.
- [6] 一般社団法人日本改質アスファルト協会：改質アスファルトポケットガイド(平成27年1月), 2015.1.
- [7] 社団法人日本道路協会：アスファルト舗装要綱(昭和63年版), 丸善株式会社, pp.28-29, 1988.
- [8] 村山雅人, 伊藤達也, 羽入昭吉, 菅野宏：高粘度改質アスファルトの開発経緯と研究開発の現状, 改質アスファルト, No.21, pp.8-21, 2003.
- [9] EAPA,EUROBITUME : Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements, Industry Report, 2004.3 .
- [10] EAPA : The use of Warm Mix Asphalt, EAPA Position Paper, 2009.6.
- [11] 社団法人日本道路建設業協会 海外技術部会：海外における低炭素社会に寄与するアスファルト舗装技術, Vo.52, No.225, pp.11-14, 2009.
- [12] 設楽直柔, 平戸利明, 村山雅人：混合温度を低減することによるアスファルトの劣化抑制効果の一検討, 土木学会学術年次講演会, V-503, 2014.9.
- [13] 遠藤桂, 立花徳啓, 志村航：製造温度の上昇が再生加熱アスファルト混合物性状に与える影響, 一般社団法人日本アスファルト合材協会設立30周年記念応募論文集,

pp.113-117, 2015.

- [14] 一般社団法人日本アスファルト協会：〈統計資料〉石油アスファルト需給実績（総括表），アスファルト
- [15] 一般社団法人日本アスファルト合材協会：統計年報，アスファルト合材
- [16] 一般社団法人日本改質アスファルト協会：改質アスファルト
- [17] 丸山記美雄，田高淳，金子雅之：ポリマー改質アスファルトⅡ型混合物舗装のLCC評価と適用範囲，改質アスファルト，第29号，pp.10-17，2007.
- [18] 久保和幸：プラント再生技術指針について，舗装，28（4），pp.3-18，1993.
- [19] 社団法人日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年版），丸善株式会社，pp.145-147，2010.
- [20] T. Hirato, M. Murayama and H. Sasaki. : Development of high stability hot mix asphalt concrete with hybrid binder , Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) . Vol. 1 Issue 6, pp.424-431, 2014.12.
- [21] 牛尾俊介：道路用ストレートアスファルトの規格と試験法について，アスファルト Vol.31, No.157, pp.9-34. 1988.
- [22] アスファルト舗装技術委員会材料開発研究分科会：舗装用ストレートアスファルトの品質規格に関する調査-材料開発分科会調査中間報告-，アスファルト，Vol.44, No.210, pp.20-53, 2002.
- [23] 牛尾俊介：道路舗装用アスファルト品質規格試験方法の検討，アスファルト，Vol.45, No.213, pp.19-22, 2003.
- [24] アスファルト舗装技術委員会材料開発研究分科会：道路舗装用アスファルト品質規格に関する調査結果，アスファルト，Vol.45, No.213, pp.31-37, 2003.
- [25] JX 日鉱日石エネルギー株式会社 産業エネルギー部門 産業燃料部 コークス・アスファルトグループ：石油アスファルト需給動向と将来展望について，アスファ

- ルト, Vol.57, No.230, pp.1-5, 2014.
- [26] 向後憲一：載荷条件の違いに着目したアスファルト混合物の疲労挙動に関する研究, 博士論文, 中央大学, 2009.
- [27] 永原篤, 村山雅人：促進耐候性試験によるバイндаおよび混合物のたわみ性の低下に関する一検討, 土木学会第63回年次学術講演会, V-5, pp.71-72, 2008.
- [28] 永原篤, 村山雅人：気象劣化に基づいたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状評価と室内再現試験, 土木学会第64回年次学術講演会, V-32, pp.63-64, 2009.
- [29] 前川亮太：繰返し載荷実験に基づくアスファルト混合物の変形および破壊挙動に関する研究, 博士論文, 中央大学, 2012.
- [30] 阿部長門, 水上純一, 坪川将丈, 斎藤泰：紫外線劣化がアスファルト混合物の疲労特性に与える影響, 土木学会第65回年次学術講演会, V-20, pp.239-240, 2010.
- [31] 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第2分冊〕, 2007.
- [32] 山之口浩：アスファルトに関する試験法, 舗装, Vo.3, No.24-28, 1968.
- [33] 松野三朗, 南雲貞夫, 三浦裕二, 山之口浩：アスファルト舗装に関する試験, pp.125-130, 1973.
- [34] 笠原靖, 雑賀義夫, 植村正：薄膜加熱試験によるアスファルトの熱劣化の検討（第1報）アスファルトの熱劣化機構について, 石油学会誌, pp.36-41, 1974.
- [35] 笠原靖, 雑賀義夫, 植村正：薄膜加熱試験によるアスファルトの熱劣化の検討（第2報）劣化による組成及び解こう性の変化, 石油学会誌, pp.41-45, 1974.
- [36] 松野三朗, 南雲貞夫, 三浦裕二, 山之口浩：アスファルト舗装に関する試験, pp.157-166, 1973.
- [37] 片脇清, 新田弘之, 佐々木巖, 中村俊行, 久保和幸：舗装用アスファルトの新しい試験方法-SHRPで提案されている品質規格-, 土木技術資料, Vol.35 No.9, pp.28-34, 1993.

第1章 総論

- [3 8] 渡邊光喜, 立石大作, 川付正明, 武田雄 : 米国における SHRP,SUPERPAVE の現況
～現地調査～, アスファルト, Vo.42, No.201, pp.3-11, 1999.
- [3 9] 七五三野茂, 鈴木秀輔, 小島逸平 : ヨーロッパを中心とした諸外国の SUPERPAVE
への対応と規格の動向, アスファルト, Vo.42, No.201, pp.12-19, 1999.
- [4 0] 新田弘之 : 日本における SUPERPAVE の現況, アスファルト, Vo.42, No.201, pp.20-
24, 1999.
- [4 1] Transportation Research Board : Characterization of Modified Asphalt Binders in
SUPERPAVE Mix Design, NCHRP Report 459, 2001.
- [4 2] 市岡他 : 改質アスファルトに対応するための SUPERPAVE 規格の改訂, アスファル
ト, Vol.50 No.222, pp.55-75, 2007.
- [4 3] FEHRL : Bitval-Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests-
- [4 4] 安崎裕, 片倉弘美, 高木信幸 : 再生加熱アスコンの供用性評価, 土木技術資料 31
-9, pp.48-53, 1989.
- [4 5] 竹下春見, 南雲貞夫 : 現場で使用されている舗装用アスファルト A,B,C 型につい
ての室内試験結果, 土木技術資料, pp.5-7, 1960.
- [4 6] P. Hubbard and H. Gollomb : Hardening of Asphalt with Relation to Development
Pavements, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.9, pp.165-
194,, 1937.
- [4 7] 上野千草, 阿部隆二, 木村孝司 : 北海道におけるアスファルト再生骨材の現状につ
いて, 第 59 回北海道開発技術研究発表会, 2015.
- [4 8] 松野三朗, 谷本誠一 : 幕張試験舗装の概要と供用状況について, 土木技術資料,
pp.13-23, 1970.
- [4 9] 飯島尚, 小島逸平, 寺島憲一 : アスファルト舗装用混合物の配合設計に関する幕張
試験舗装の解析, 土木技術資料, pp.34-39, 1982.12.

第1章 総論

- [50] 飯島尚, 岩崎尚義: 幕張試験舗装におけるアスファルトの老化と供用性, 土木技術資料, pp.117-122, 1985.
- [51] 小島逸平, 猪股和義: 幕張試験舗装調査結果, 第15回日本道路会議, pp.267-268, 1983.
- [52] 月成稔, 谷本誠一: 幕張および大日, 横戸試験舗装の経過と概要(上), 舗装, 1972.
- [53] 月成稔, 谷本誠一: 幕張および大日, 横戸試験舗装の経過と概要(下), 舗装, 1972.
- [54] 丸山記美雄, 岳本秀人, 笠原篤: 配合の異なる混合物の疲労破壊特性に関する検討, 土木学会舗装工学論文集, 第9巻, pp.141-148, 2004.4.
- [55] 社団法人土木学会: 舗装標準示方書(2014年制定), 丸善株式会社, pp.30-31.2014.
- [56] 宇佐美圭一, 阿部長門, 雑賀義夫, 丸山暉彦: アスファルト混合物のレジリエントモジュラス(その2), 土木学会第48回年次学術講演会, V-386, pp.798-799, 1993.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] W. Heukelom: Observations on the rheology and fracture of bitumens and asphalt mixes, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, pp.358-399, 1966.
- [60] C. VAN DER POEL: A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, pp.221-236, 1954.
- [61] 牛尾俊介: アスファルトの工学特性, 主としてクリープに関する研究(第1報), 石油学会誌, Vo.21, pp.167-174, 1978.
- [62] 社団法人日本道路協会: 道路用語辞典(第3版), 1997.
- [63] ASTM: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, D7175-08, 2008.

- [6 4] AASHTO : Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, T315-12, 2012.
- [6 5] Javed Bari and Matthew W. Witczak : Development of a New Revised Version of the Witczak E*Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.75, pp.381-423, 2006.
- [6 6] NCHRP : Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37 A Final Report, 2004.3.
- [6 7] J. Read and D. Whiteoak : The Shell Bitumen Handbook Fifth edition, 2003.
- [6 8] 佐藤勝久, 八谷好高, 阿部洋一: 自然環境下でのアスファルトコンクリートの老化, 第43回土木学会学術講演会, V-13, pp.74-75, 1988.
- [6 9] 笠原靖, 植村正, 牛島幸司郎: 供用中におけるアスファルト舗装の老化の研究-アスファルトの劣化に及ぼす路面からの深さの影響-, 石油学会誌, pp30-33, 1975.1.
- [7 0] 湯村竜洋: 暫定施工で未供用のまま長年放置した基層に新しく表層を施工する場合の一処置例について, 道路建設, pp.66-72, 1980.2.
- [7 1] 阿部洋一, 古財武久: 滑走路舗装の経年変化と材料特性, 石油学会誌, 1985.6.
- [7 2] 高橋茂樹, 吉野公朗, 早川泰史, 原田秀一, 砂金克明: 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, 土木学会第68回年次学術講演会, pp.835-836, 2013.9.
- [7 3] 高橋茂樹, 舘岡豊, 吉野公朗: 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 - 主な知見 -, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014.
- [7 4] 小林真依, 村山雅人, 平戸利明, 姫野賢治, 高橋茂樹: アスファルト舗装の深度方向におけるアスファルトの気象劣化現象に着目した調査結, 土木学会年次学術講演会, V-504, 2014.9.
- [7 5] 平戸利明, 村山雅人, 姫野賢治, 高橋茂樹. 長期供用された高速道路で用いたアス

第1章 総論

- ファルトの気象劣化現象に関する調査結果, 土木学会舗装工学論文集.E1 (舗装工学) . Vol.70, No.3, pp.123-130, 2014.12.
- [76] 小林真依, 村山雅人, 平戸利明, 姫野賢治, 高橋茂樹: DSR を用いた長期供用劣化したアスファルトの性状評価結, 土木学会第70回年次学術講演会, V-261, 2015.9.
- [77] 設楽直柔, 村山雅人, 平戸利明, 姫野賢治, 高橋茂樹: 長期供用したアスファルトの組成変化に関する一検討, 土木学会第70回年次学術講演会, V-262, 2015.9.
- [78] 山口勝之, 佐々木巖, 明嵐政司: アスファルト材料の紫外線劣化とカーボンブラック添加効果, 土木学会舗装工学論文集, 第8巻, pp.251-260, 2003.
- [79] S.A.Tabatabaei : EVALUATE AGING EFFECT OF SBS MODIFIED BITUMEN, World Academy of Science Engineering and Technology, pp.261-264, 2013.
- [80] 平戸利明, 姫野賢治, 村山雅人, 高橋茂樹: 長供用劣化がアスファルトの粘弾性状に及ぼす影響, Journal of the Japan Petroleum Institute, 59, (3), pp.97-103, 2016.
- [81] 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, 2006.
- [82] 松野三朗: わだち割れ(1) アスファルト舗装の縦表面クラックについて, 舗装, pp.3-8, 1984.2
- [83] NCHRP : Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers: Models for Initiation and Propagation, web-only Document 162, 2010.2.
- [84] Terhi Pellinen, Geoff Rowe, Kalapi Biswas, FHWA : Evaluation of Surface (Top Down) Longitudinal Wheel Path Cracking, 2004.9.
- [85] 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.
- [86] 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.123, 2006.

- [8 7] <http://www.pavementinteractive.org/article/top-down-cracking/>
- [8 8] M. Dautzats and A. Rampal : Mechanism of Surface in wearing courses, Proceedings, 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavement, pp.232-247, 1987.
- [8 9] S. Matsuno, and T. Nishizawa: Mechanism of Longitudinal Surface Cracking in Asphalt Pavement. Proceedings, Volume 2, 7th International Conference on Asphalt Pavements, The University of Nottingham, pp. 277-291, 1992.
- [9 0] M. de Beer, C. Fisher and Fritz J. Jooste : Determination of Pneumatic Tyre/pavement Interface Contact Stresses under Moving Loads and Some Effects on Pavements with Thin Asphalt Surfacing Layers, Proceedings, 8th International Conference Structural Design of Asphalt Pavement, pp.179-227, 1997.
- [9 1] K. Himeno, T. Ikeda, T. Kamijima and T. Abe: Distribution of Tire Contact Pressure of Vehicles and Its Influence on Pavement Distress. Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, Washington, pp.129-139, 1997.8.
- [9 2] Myers, L.A., Roque, R., and Ruth B.E. : Mechanisms of Surface-Initiated Longitudinal Wheel Path Cracks in High-Type Bituminous Pavements. Proceedings, Volume 67, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, pp.401-432, 1998.
- [9 3] Jeff Uhlmeyer, Kim Willoughby, Linda Pierce and Joe Mahoney: Top-Down Cracking in Washington State Asphalt Concrete Wearing Courses, Journal of the Transportation Research Board, Vol.1730, pp.110-116, 2000.
- [9 4] 松野三朗 : わだち割れ (2) アスファルト舗装の縦表面クラックについて, 舗装, pp.3-8, 1984.3.
- [9 5] 松野三朗, 内田喜太郎: 機能の設計に必要な計測 ひびわれ抵抗性能, アスファル, Vol.44 No.208, pp.28-37, 2001.

第1章 総論

- [96] 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦: アスコン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.
- [97] 内田喜太郎, 黒川勤, 姫野賢治, 西澤辰男: アスコン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.
- [98] 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.
- [99] Kazushi Komoriya, Takeshi Yoshida, Hiroyuki Nitta : WA-DA-CHI-WA-RE Surface Longitudinal Cracks on Asphalt Concrete Pavement, TRB, 2001.
- [100] Matsuno,S.and Nishizawa,T. Longitudinal Surface Cracking of Flexible Pavement, Proc.Paving in Cold Areas Mini-Workshop, Canada/Japan Science Technology Consultation, pp.779-796, 1984.
- [101] 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.
- [102] 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.

第1章 総論

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

2. 1 緒 言

長期供用されたアスファルトの性状を把握するため、交通履歴や補修履歴が明確な高速道路にて、長期供用されたアスファルト舗装から、舗装損傷の有無、供用年数、車輪通過の有無あるいは混合物の種類などに分けてブロック状の試料を採取した。

第2章では、採取したブロック状の試料を表層、基層、アスファルト安定処理層について、それぞれの層に使用された混合物に含まれるバインダ性状を調査した結果について述べる。なお、本調査は、東日本高速道路株式会社で行っている「アスファルト舗装の解体新書プロジェクト」の一環として、高速道路における供用劣化の実態調査を兼ねて実施したものである [1] [2] [3] [4].

2. 2 調査箇所の概要

調査したアスファルト舗装は、上信越道の長野～須坂長野東間（下り）、須坂長野東～長野間（上り）、長野道の豊科～麻績間（下り）、麻績～更埴間（下り）の4地点から試料を採取した [1]。表 - 2.1 に調査箇所の概要を示す。表中に示す路面の状況は、健全部では A、ひび割れが生じている損傷部は D、ひび割れが軽微な損傷部は C で表している。

各高速道路の交通量は、およそ 1.4～1.5 万台/日・方向であり、大型車混入率は 19%～22%である。開通は、上信越道の須坂長野東～長野間は 1995 年 11 月、それ以外の区間は 1993 年 3 月である。その後、一部の区間で表・基層あるいは安定処理層まで補修され、このときの表層には、表中に示すように密粒度アスコン（以下、密粒度）あるいはポーラスアスコン（以下、ポーラス）が使用されていた。写真 - 2.1 に、ブロックの採取状況、写真 - 2.2 に舗装断面の例を示す。舗装は層間が強固に付着して一体となって交通車両の荷重を分散させることが求められるが、写真 - 2.2 に示すように層間剥離が生じると水が滞水し、舗装の破損を促進させる可能性がある。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

表 - 2.1 調査箇所の概要

路線・IC間	開通	工区	番号	採取位置	表層の種類	路面の状況	表基層の補修時期
上信越道(下り) 長野～須坂長野東	1993.3	121工区	No.1	路肩部	密粒度	A	—
			No.2	車輪通行部	密粒度	A	—
上信越道(上り) 須坂長野東～長野	1995.11	72工区	No.3	車輪通行部	密粒度	A	—
			No.4	車輪通行部	密粒度	D	—
			No.5	車輪通行部	密粒度	C	—
			No.6	車輪非通行部	密粒度	C	—
長野道(下り) 豊科～麻績	1993.3	39工区	No.7	車輪通行部	ポーラス	D	2005
			No.8	路肩部	ポーラス	D	2005
			No.9	路肩部	密粒度	D	—
			No.10	車輪非通行部	密粒度	D	1998
			No.11	車輪通行部	密粒度	D	1998
長野道(下り) 麻績～更埴	1993.3	姨捨工区	No.12	路肩部	ポーラス	A	2005
			No.13	車輪通行部	ポーラス	A	2005
			No.14	車輪通行部	ポーラス	D	2005

路面の状況の評価

A: 健全部

C: ひび割れが軽微な損傷部

D: ひび割れが生じている損傷部

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果



写真 - 2.1 ブロックの採取状況



写真 - 2.2 39 工区路肩部の舗装断面（表層：ポーラス）

2.3 実験方法

図-2.1に、長期供用されたアスファルト舗装から採取した試料を用いた実験フローを示す。これらの研究成果は、第2章から第3章にかけて述べる。

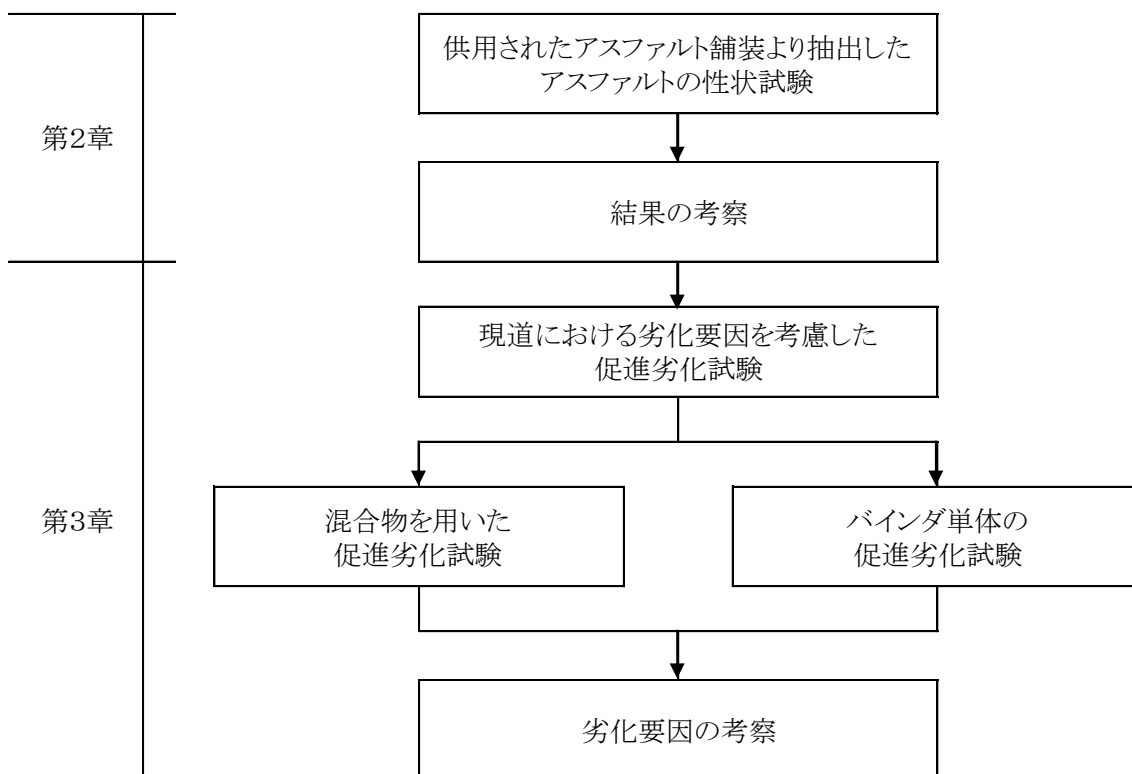


図 - 2.1 研究フロー

2. 4 試料の調整方法

高速道路の既設舗装より，表層から上層路盤までのアスコン層をブロック（45 cm×45 cm×18 cm）で採取した．採取した箇所によりアスコンの厚さはわずかに異なる．

舗装表面がもっとも劣化が進行していることが予想されることから，表層 1 cm とその下部 3 cm に分けてスライスした．基層や安定処理路盤については，均等に 3 分割とした．**図-2.2**にブロックのスライス方法，**写真-2.3~2.7**にスライスした試料を示す．

スライスした混合物は，健全部では所定の形状に切断できたが，損傷が著しい箇所では切断している間に混合物が破損してしまうもの，あるいは**写真-2.5**に示すように下層からひび割れが進行しているものもあった．

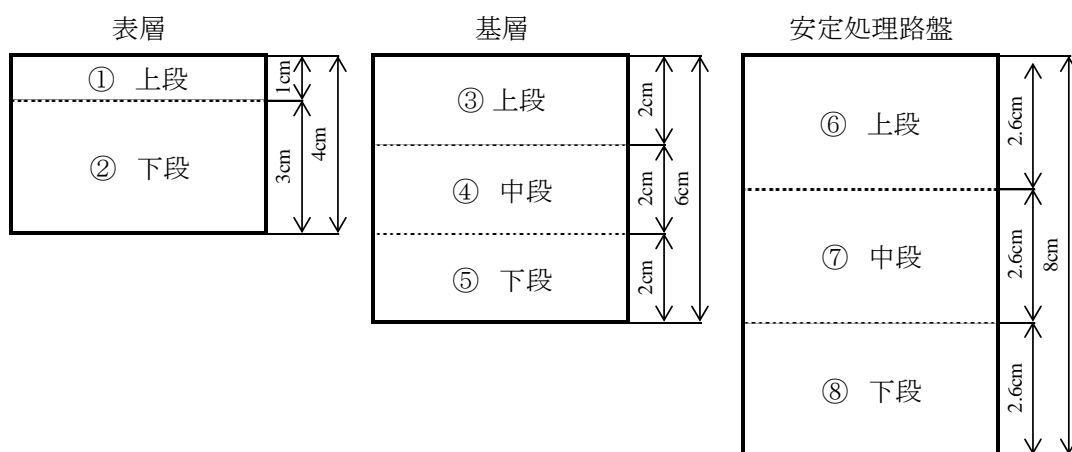


図-2.2 抽出用試料のスライス位置

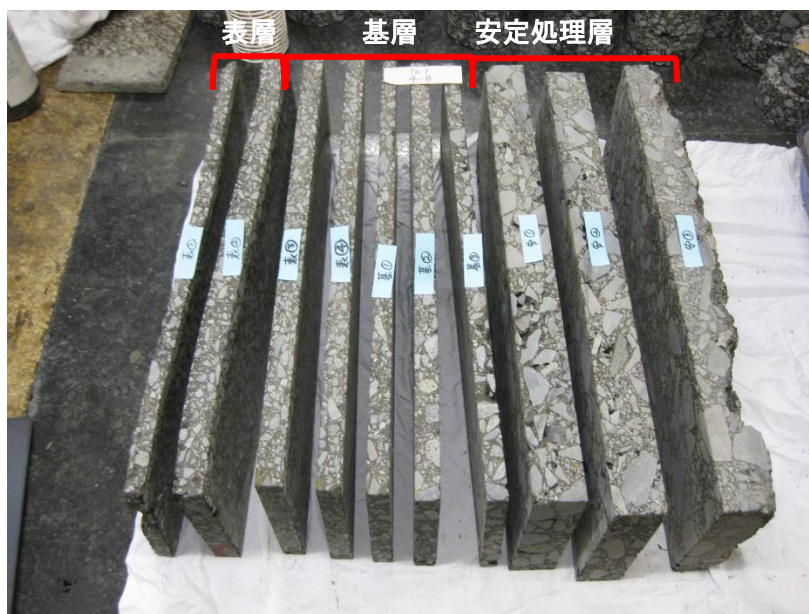


写真-2.3 121 工区 車両通行位置より採取した試料（密粒，健全部）

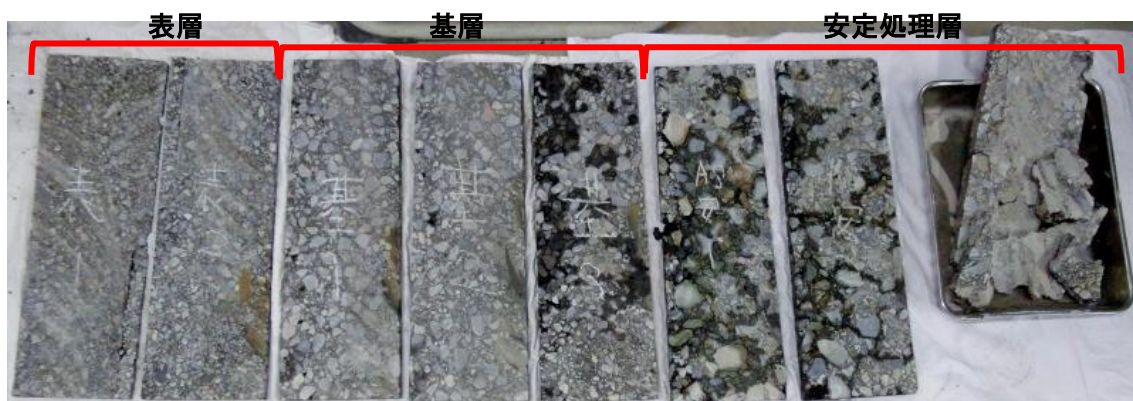


写真-2.4 72 工区 車両通行位置より採取した試料（密粒，軽微な損傷部）

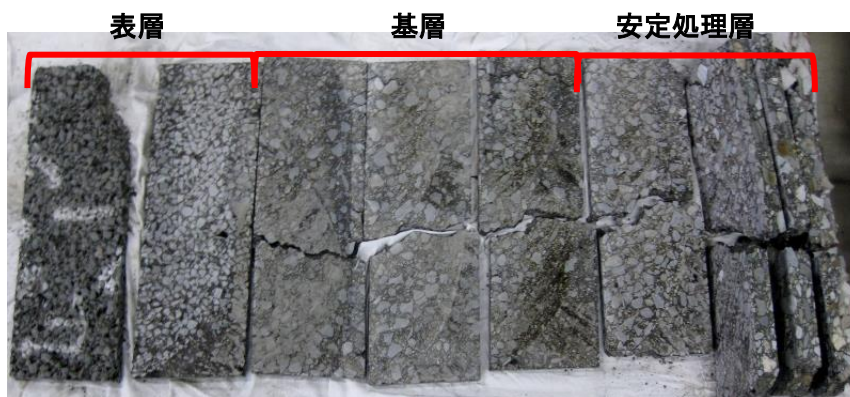


写真 - 2.5 39 工区 車両通行部より採取した試料（ポーラス，非健全部）

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果



写真 - 2.6 39 工区 車両非通行部より採取した試料（密粒，非健全部）

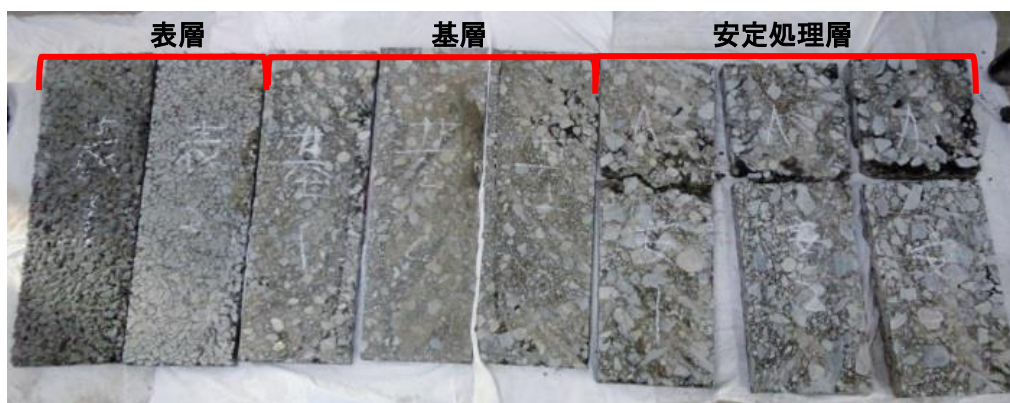


写真 - 2.7 姨捨工区 車両非通行部より採取した試料（ポーラス，非健全部）

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

建設時の記録から、バインダはストレートアスファルト（以下、ストアス）が使用されていた。補修された区間で使用されたバインダは不明である。改質材の有無を調査する目的で、舗装・調査試験法便覧「A058 ポリマー改質アスファルト中に含まれる SBR の定量試験方法」に準拠して試験した [5]。その結果、すべてのポーラスには SBS が示す波数 965 cm^{-1} の吸収が見られ、かつ軟化点も $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前後であることからポリマー改質アスファルト H 型（以下、改質 H 型）が使用されていると推定される。

2. 5 アスコンの品質評価方法

アスファルト舗装では、車両の走行や雨水などの影響により、供用中にアスコンの骨材粒度、アスファルト量、密度などの品質が変化している可能性がある。そこで、スライスした試料について、まず混合物の品質試験を行った。

ブロックから採取した試料は、表層、基層、安定処理層に分けて切断し、それらの密度を測定した。さらに、コンクリートカッタによる切断面のある骨材を取り除いた試料を用いて、抽出試験を行った。混合物からの骨材の抽出は、自動遠心分離抽出器を用いた抽出方法とし、抽出後の試料のふるい分け試験を行った。密度試験、抽出試験および骨材のふるい分け試験は舗装調査・試験法便覧に準じて行った [5]。

2. 6 回収アスファルトの評価方法

ブロックからアブソン法 (ASTM1856-95a) に基づいてアスファルトを抽出した。

舗装・調査試験法便覧では、アスファルトの抽出試験に用いる溶剤としてトリクロロエチレンが推奨されているが、ここでは安全性を考慮し、プロピルブロマイドを用いることとした。表-2.2 に抽出条件を示す。

表-2.2 抽出回収条件

項目	内容
135°C時の不活性ガス流量	200 ml/min
160°C時の不活性ガス流量	1600 ml/min
160°C保持時間	30 min.
抽出溶剤	n- propyl bromide

2.7 アスファルト性状の評価方法

2.7.1 一般的な性状評価方法

回収したアスファルトの評価試験には、針入度試験、軟化点試験、伸度試験を舗装調査・試験法便覧に準じて行った。

2.7.2 赤外分光分析の解析方法

赤外分光分析は、島津製作所製フーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）を用いて、溶剤を用いずにアスファルトを直接測定可能な Attenuated Total Reflection（ATR）法により分析した。表-2.3 に試験条件、写真-2.8 に試験機の外観を示す。

表-2.3 赤外分光光度計機の概要

型 式	FT-IR 8400S
	島津製作所製
分析機構	フーリエ変換赤外分光光度計
検出器	ATR(全反射測定法)
波長範囲	7,800~350cm ⁻¹

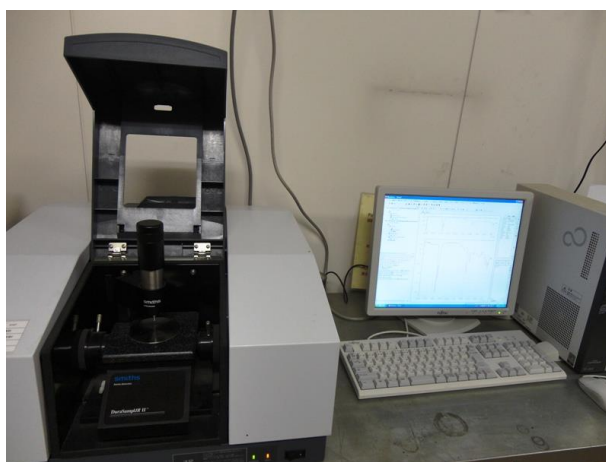


写真- 2.8 フーリエ変換赤外分光光度計の外観

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

赤外線を分子に照射すると、分子を構成している原子間の振動エネルギーに相当する赤外線を吸収する。この吸収度合いを調べることによって化合物の構造推定や定量を行う赤外分光法を行う。

既往の文献 [7] [8] より、赤外線吸光分析結果によるスペクトル分析は、針入度や伸度など、他の劣化指標との相関関係が高く、アスファルトバインダの劣化を評価するための指標として有効であるとされている。既往の文献 [6] では、さまざまな波数に着目しアスファルトの劣化に関する検討を行っているが、ここでは、酸化劣化の進行によるカルボニル基の増加に着目し、図 - 2.3 に示す方法により、カルボニル基の吸収を示す 1700 cm^{-1} の吸光度を算出し比較検討した。

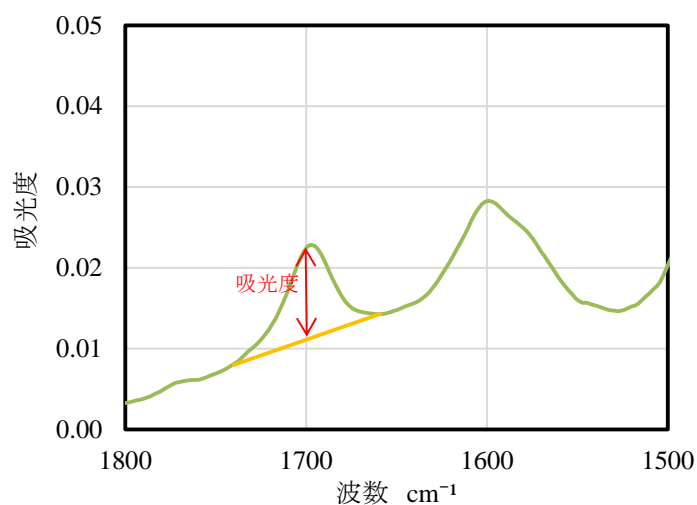


図 - 2.3 吸光度の求め方

2. 7. 3 アスファルトのスティフネスの測定方法

アスファルトのスティフネスは、アスファルトの針入度と軟化点などから推定する方法と Dynamic shear Rheometer (DSR) 試験から得られる複素せん断弾性率から算出した。

(1) ノモグラフによるアスファルトのスティフネスの推定

アスファルトは完全弾性体ではないため、弾性係数 E は温度や载荷速度に依存する。Heukelom は応力 σ とひずみ ϵ からアスファルトのスティフネス S_{bit} を (1.1) 式により定義し、载荷時間 t と温度 T の関数で示した [9]。

$$S_{bit} = \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)_{t,T} \quad (1.1)$$

Van Der Poel は、針入度、軟化点、*Penetration Index (PI)*、任意の载荷時間および温度からアスファルトのスティフネスを推定するノモグラフ (図-2.4) を作成している [10]。

姫野は、各要素を入力することで Van Der Poel のノモグラフからアスファルトのスティフネスを計算するソフト「Estimation of Sbit and Smix using van der Poel's nomograph and Heukelom's equation (SbitSmix)」を開発しており [11]、ここでは、このプログラムによりアスファルトのスティフネスを計算することとした。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

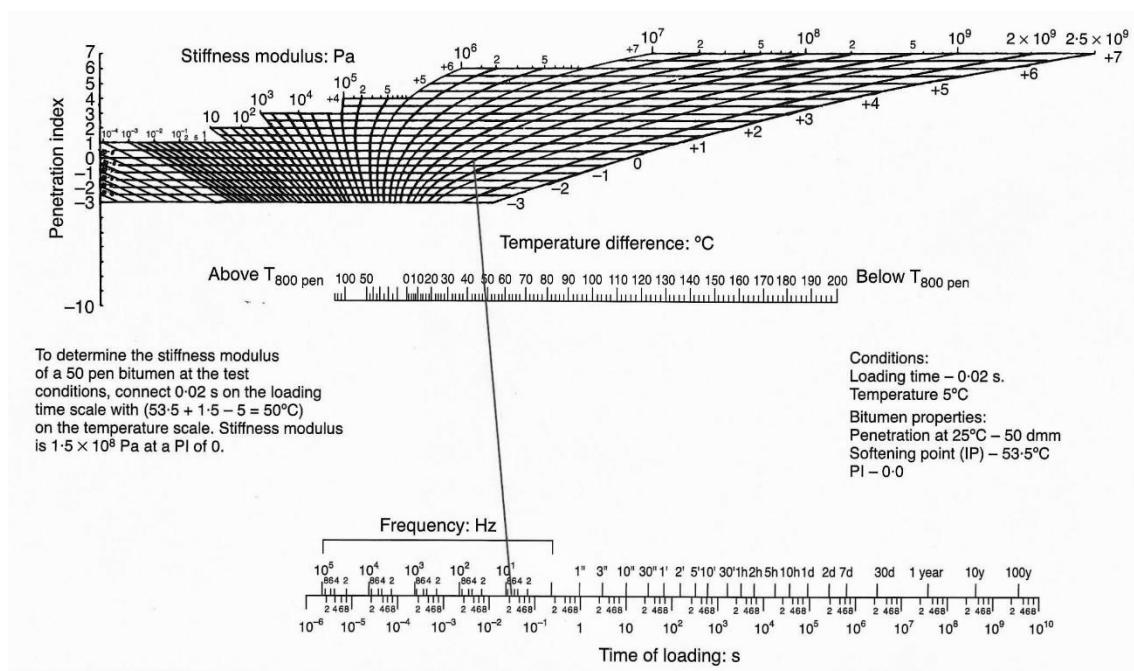


図-2.4 Van der poel のノモグラフ

(2) レオメータによるスティフネスの測定

使用した DSR 試験機は AR1000 (TA インストルメント社製) である。

表-2.4 に試験条件, 表-2.5 に試験機の仕様を示す. 半径 r , 試料厚さ h の平行円盤を用いた動的粘弾性測定の場合, バインダサンプルを一定周波数 ω で正弦振動を与えたときの回転角 θ とトルク τ により, せん断応力 σ およびひずみ γ は (2.1), (2.2) 式で与えられる.

表-2.4 DSR 試験の条件

項目	内容
試験温度	20°C, 40°C, 60°C
周波数	0.1-100rad/s
プレート直径	8mm
試料厚さ	1mm
ひずみ	10%

表-2.5 粘弾性測定装置の概要

型 式	動的粘弾性測定装置 AR1000
	TAインストルメント
測定方法	せん断測定
検出器	トルクトランスデューサ
周波数	0.1~100 rad/s
ひずみ	10%
トルク範囲	0.0001~100mN・m
測定温度	20°C、40°C、60°C

$$\sigma_{\tau} = \frac{2 \cdot \tau}{\pi \cdot \gamma^3} \quad (2.1)$$

$$\gamma = \frac{\theta \cdot r}{h} \quad (2.2)$$

- σ_{τ} : せん断応力 (MPa)
- τ : トルク (N・mm)
- h : 試料厚さ (mm)
- r : 半径 (mm)
- ω : 周波数 (rad/s)
- θ : 回転角 (rad)

図-2.5 に粘弾性材料の応力ひずみ曲線を示す。フックの法則に従う弾性体の場合は、応力とひずみの位相は一致するが、アスファルトのような粘弾性体では温度に応じて、ひずみの位相角 δ が $0 < \delta < \pi/2$ の間で遅れて測定される。

DSR 試験により得られるせん断強度およびそのひずみから複素せん断弾性率 $|G^*|$ を (2.3) 式により算出する。

$$|G^*| = \frac{\sigma_{\tau max} - \sigma_{\tau min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (2.3)$$

$|G^*|$: 複素せん断弾性率 (MPa)

さらに、そこから貯蔵せん断弾性率 G' および損失せん断弾性率 G'' を (2.4), (2.5) 式により算出した。貯蔵せん断弾性率 G' は弾性的性質、損失せん断弾性率 G'' は粘性的性質を示すものである。

$$G' = |G^*| \cdot \cos \delta \quad (2.4)$$

$$G'' = |G^*| \cdot \sin \delta \quad (2.5)$$

G' : 貯蔵せん断弾性率 (MPa)

G'' : 損失せん断弾性率 (MPa)

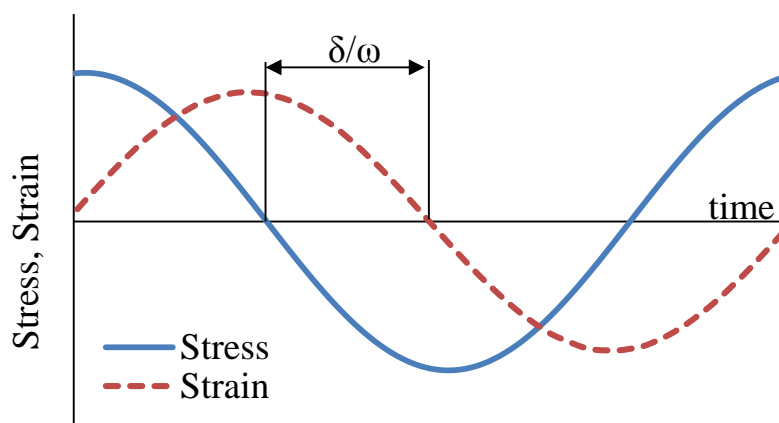


図-2.5 粘弾性材料の応力 - ひずみ曲線の例



写真-2.9 動的粘弾性測定装置の外観



写真-2.10 試料の設置状況

アスコンの破壊までの载荷回数は、载荷条件に依存しているが、Van Dijk [12]、姫野ら [13] は、繰返し载荷試験から得られる散逸エネルギーが、温度、周波数、アスファルトの種類、制御方法によらず破壊に至るまでの回数と両対数紙上で直線関係にあることを述べている。

1周期単位あたりの散逸エネルギー W_0 は(2.6)式で表され、 $|E^*| = \sigma_0/\varepsilon_0$ を(2.6)式に代入すると(2.9)式のとおり、単位散逸エネルギーは損失せん断弾性率と比例関係にある。

$$W_0 = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \sin \delta \quad (2.6)$$

$$W_0 = \pi \cdot \epsilon_0^2 \cdot |E^*| \cdot \sin \delta \quad (2.7)$$

$$E'' = |E^*| \cdot \sin \delta \quad (2.8)$$

$$W_0 = \pi \cdot \epsilon_0^2 \cdot E'' \quad (2.9)$$

さらに、正弦波で载荷した場合の総散逸エネルギーと破壊に至るまでの载荷回数
の関係が両対数上で直線関係にあるため、(2.10) 式が成立する。

$$W = B \cdot N^Z \quad (2.10)$$

ここに、 W ：破壊までの総散逸エネルギー

N ：破壊に至るまでの载荷回数

B, Z ：材料定数

(2.9) 式と (2.10) 式を等値とすることにより、(2.11) 式を得ることができる。

$$N = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \pi \cdot \epsilon_i^2 \cdot E_i''}{B} \right)^{\frac{1}{Z}} \quad (2.11)$$

複素せん断弾性率 G と弾性率 E には (2.12) 式の関係がある。

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.12)$$

ここに、 G ：複素せん断弾性率

E ：弾性率

ν ：ポアソン比

アスファルトのポアソン比 ν は、温度により変化する可能性はあるが、ここでは 0.5 と仮定すると (2.12) 式は以下のように表される。

$$3 \cdot G = E \quad (2.13)$$

ここで、アスコンの破壊をアスファルトの破壊とみなすことにより、(2.11) 式を (2.14) 式のように表すことができる。

$$N_{fa} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N 3\pi \cdot \epsilon_i^2 \cdot G_i''}{B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

破壊に至るまでの載荷回数は、使用する骨材、骨材配合、使用するアスファルトやそのアスファルト量、構築した舗装の品質あるいは環境条件や設計条件などに大きく依存するが、構築した材料に対して固有の値と考えられる。供用されることによりアスファルトが劣化し、アスファルトの損失せん断弾性率 G'' が高くなると、単位散逸エネルギー W_0 が大きくなるため、破壊までの載荷回数は減少する。すなわち、単位散逸エネルギーの増大を抑制するためには、DSR 試験から得られるバインダの損失せん断弾性率を低く抑えることが有効と考えられる。

2.7.4 組成分析方法

組成分析は、石油学会の「TLC/FID法によるアスファルト組成分析試験方法」に基づいて行った。

表-2.6 組成分析機器（イアトロスキャン）の概要

型 式	イアトロスキャン MK-5
	三菱化学ヤトロン製
分析機構	クロマロッド(専用薄層棒)による薄層クロマトグラフィ
検出器	水素炎イオン化検出器(FID)



写真-2.11 組成分析機器（イアトロスキャン）の外観

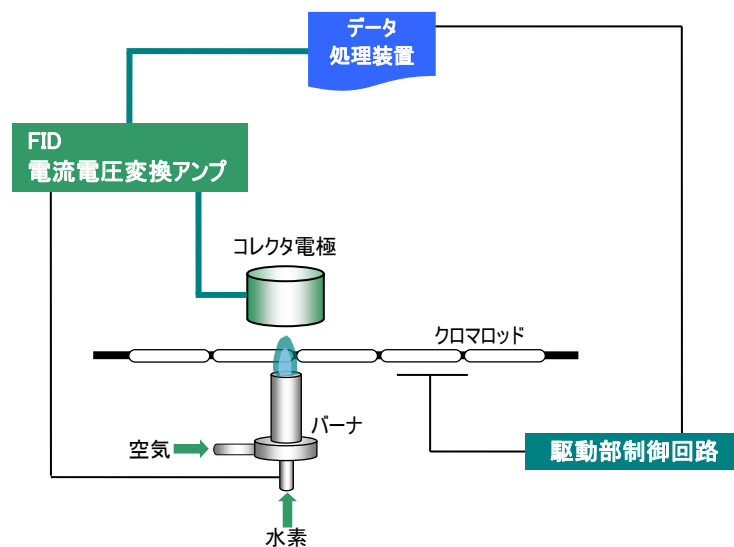


図-2.6 組成分析機器（イアトロスキャン）の原理

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

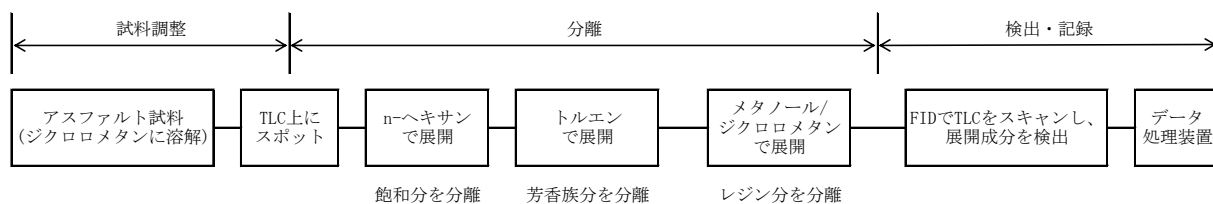


図-2.7 組成分析機器（イアトロスキャン）の分析方法

2. 8 混合物の品質試験結果

(1) 抽出後の骨材粒度の調査結果

アスコンは、供用されることにより、主に粗骨材が破損し、設計した当初よりも粒度が細くなる可能性がある。そこで、表層、基層、アスファルト安定処理路盤に分けた混合物からアスファルトを抽出し、残った骨材についてふるい分け試験を行った。

図-2.8のaからoにふるい分け試験の結果を示す。健全部は実線、非健全部は破線により示している。図中の粒度範囲は、設計当時の粒度範囲ではなく、現在の舗装設計要領[14]に記載されている混合物の粒度範囲を示しており、図中に使用した粒度範囲として記載した。また、39工区と姨捨工区については、補修工事における試験施工時の表基層の粒度データを参考に比較検討した。121工区は、供用19年の表層に密粒度を用いたアスファルト舗装であり、車線中央部にひび割れが一部発生していたものの概ね健全な舗装であった。ここでは車輪通行部と非通行部による比較を行った。

図-2.8aからcを見ると基層混合物と安定処理混合物の2.36mmより大きなふるい目で車輪通行部と非通行部にわずかな差が見られたが、各層の混合物について2.36mmと0.075mmの通過質量百分率はほぼ同程度の通過質量百分率であった。

72工区は、供用17年であり、表層に密粒度を用いたアスファルト舗装であった。ここでは、アスファルト舗装の損傷程度に分けて試料を採取し比較した。

図-2.8dからfを見ると、121工区同様に2.36mmと0.075mmに着目すると、各層の混合物について損傷の程度や車輪通行の有無による粒度の違いはほとんど見られなかった。

39工区では、表層に使用されている混合物は、ポーラスと密粒度の区間がありともに非健全部より試料を採取した。ポーラス工区では2005年、密粒度工区では1998年にそれぞれ表基層の補修工事がなされている。図-2.8gからlを見ると、表層は、ポーラスと密粒度ともに設定した粒度範囲では上限であった。基層混合物は、車輪通行部と非通行部で傾向が見られなかった。安定処理混合物では、密粒度工区とポーラス工区あるいは車輪走行の有無で

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

は差は見られなかった。

姨捨工区は、表層にポーラスを用いたアスファルト舗装であり、健全部と非健全部より試料を採取した。供用年数はともに7年程度である。図 - 2.8m から o を見ると、舗装の損傷状態や車輪通行による影響は見られなかった。ここでも 39 工区のポーラスと同様に 4.75 mm 以下の通過質量百分率が粒度範囲に対して上限となっていた。基層用混合物や安定処理混合物においては、舗装の損傷状態や車輪通行による影響は見られなかった。試験施工時の粒度曲線と比較すると、やはりポーラスの 4.75 mm 以下の通過質量百分率が高くなっており、ポーラスでは、交通車両による粗骨材の細粒化や周辺部からの堆積物による影響を受けていると考えられる。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

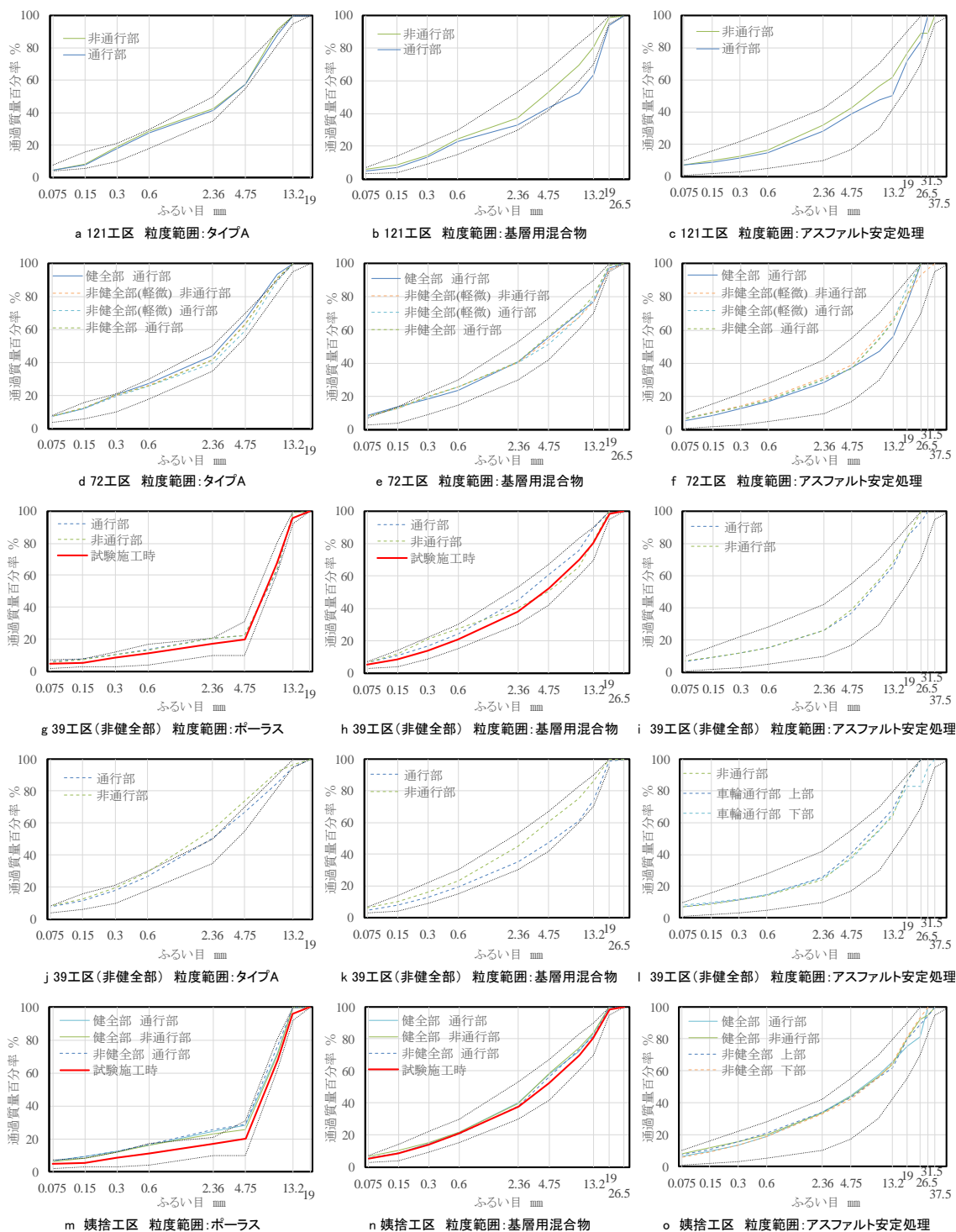


図 - 2.8 各工区における骨材粒度の試験結果

(2) アスファルト量の調査結果

図-2.9のaからeにアスファルト量の調査結果，fに各工区について車輪非通行部に対する車輪通行部のアスファルト量の低下率を平均して示した。図中塗りつぶしてあるものは健全部，色抜きしたものは非健全部を示す。39工区および姨捨工区の表基層におけるアスファルト量は，補修時に行われた試験施工での値を記載している。図-2.9dに示す39工区における密粒度工区の安定処理層では，損傷が著しく測定できなかったためにデータが欠損している。

図-2.9bで損傷程度による影響について比較すると，表層混合物では，健全部と比較し非健全部ではわずかにアスファルト量が少ない値を示していた。基層や安定処理層では明確な違いは見られなかった。39工区のポーラスと密粒度の下層のアスファルト量について比較すると，ポーラスの下部では雨水による影響を受けやすいと考えられるが，基層用混合物にアスファルト量の差異は見られなかった。安定処理層の損傷が著しかった39工区の密粒度区間と姨捨工区の非健全部区間の安定処理層を上部と下部に分けてアスファルト量を調査した結果，骨材粒度では明確な違いは見られなかったが，両工区で下部のアスファルト量が少なくなっていることが確認された。これは，雨水がアスファルト舗装に浸透し，空隙の大きなアスファルト安定処理層に滞水し剥離が生じ，ここに交通車両による繰返し荷重が加わることで，さらに促進されたものと考えられる。

図-2.9fより，車輪通行の有無について比較すると，一部を除いて車輪通行部のアスファルト量が全層においてわずかに少なくなっており，その影響は表層，基層，安定処理層の順に大きくなっていった。また，試験施工時のアスファルト量と比較すると，損傷の著しかった39工区のポーラスのアスファルト量の低下が顕著であった。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

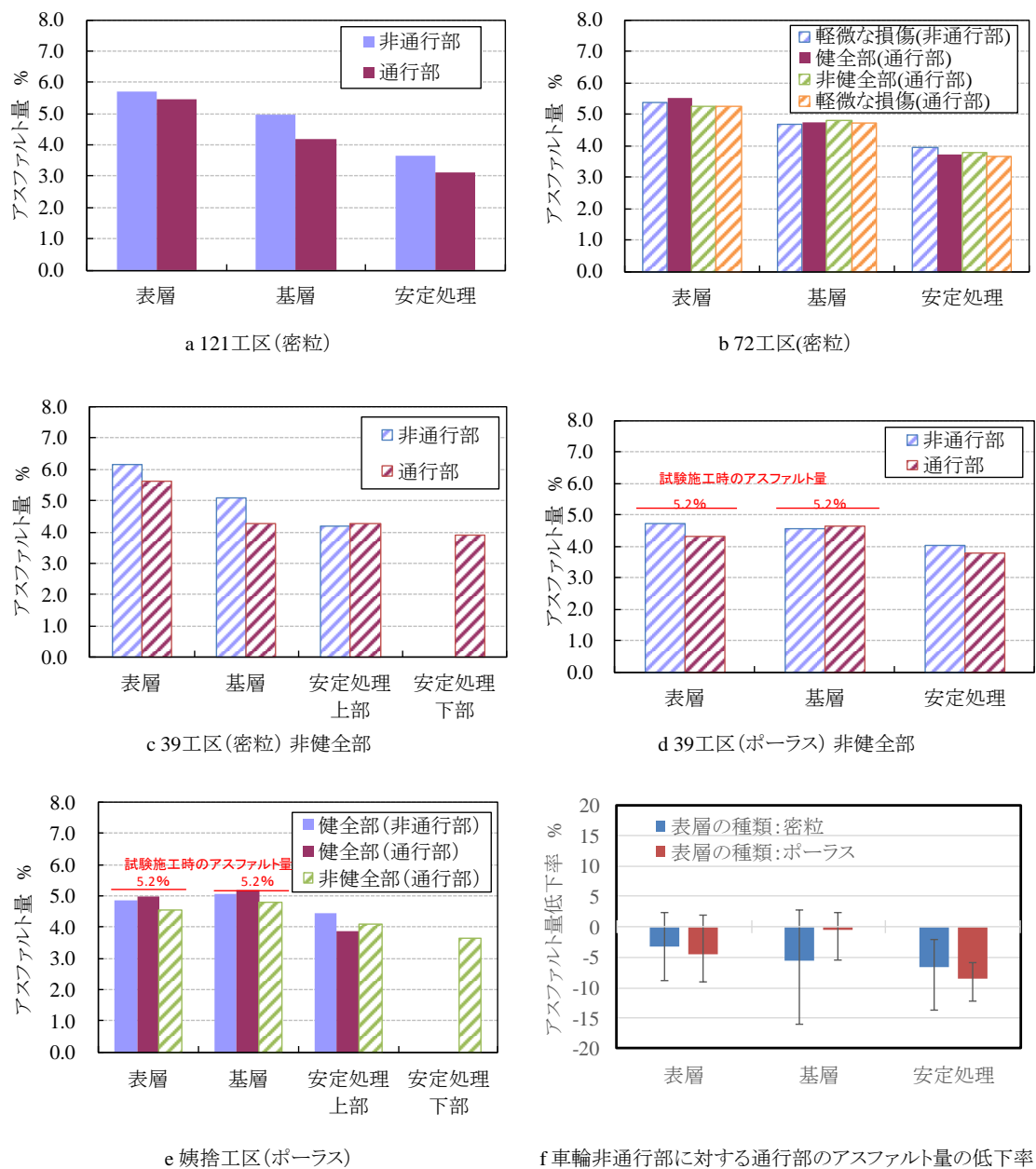


図 - 2.9 各工区におけるアスファルト量の調査結果

(3) 密度試験結果

図-2.10a から e に密度試験の結果, f には各工区について車輪非通行部に対する車輪非通行部の密度増加率(空隙率の変化)を平均して示した. 図-2.9d と同様に, 図-2.10d に示す 39 工区における密粒度工区の安定処理層では, 損傷が著しく測定できなかったためにデータが欠損している.

図-2.10f より, 混合物の種類によりその傾向は異なるが, 車輪走行の有無により表基層の密度は変化しているが, 安定処理層ではほとんど影響を受けていないことが分かる. 表層の種類に着目すると, 密粒度では表層, 基層ともに空隙率で 2%程度車輪通行部のほうが上昇しているのに対し, ポーラスでは表層上部と下部でその傾向が異なり, 上部では密度が低くなり, 下部で密度が高くなっていた. これは車輪走行により, 表面では骨材飛散することにより密度が低下し, 内部では圧密され空隙が低くなっていることが考えられる.

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

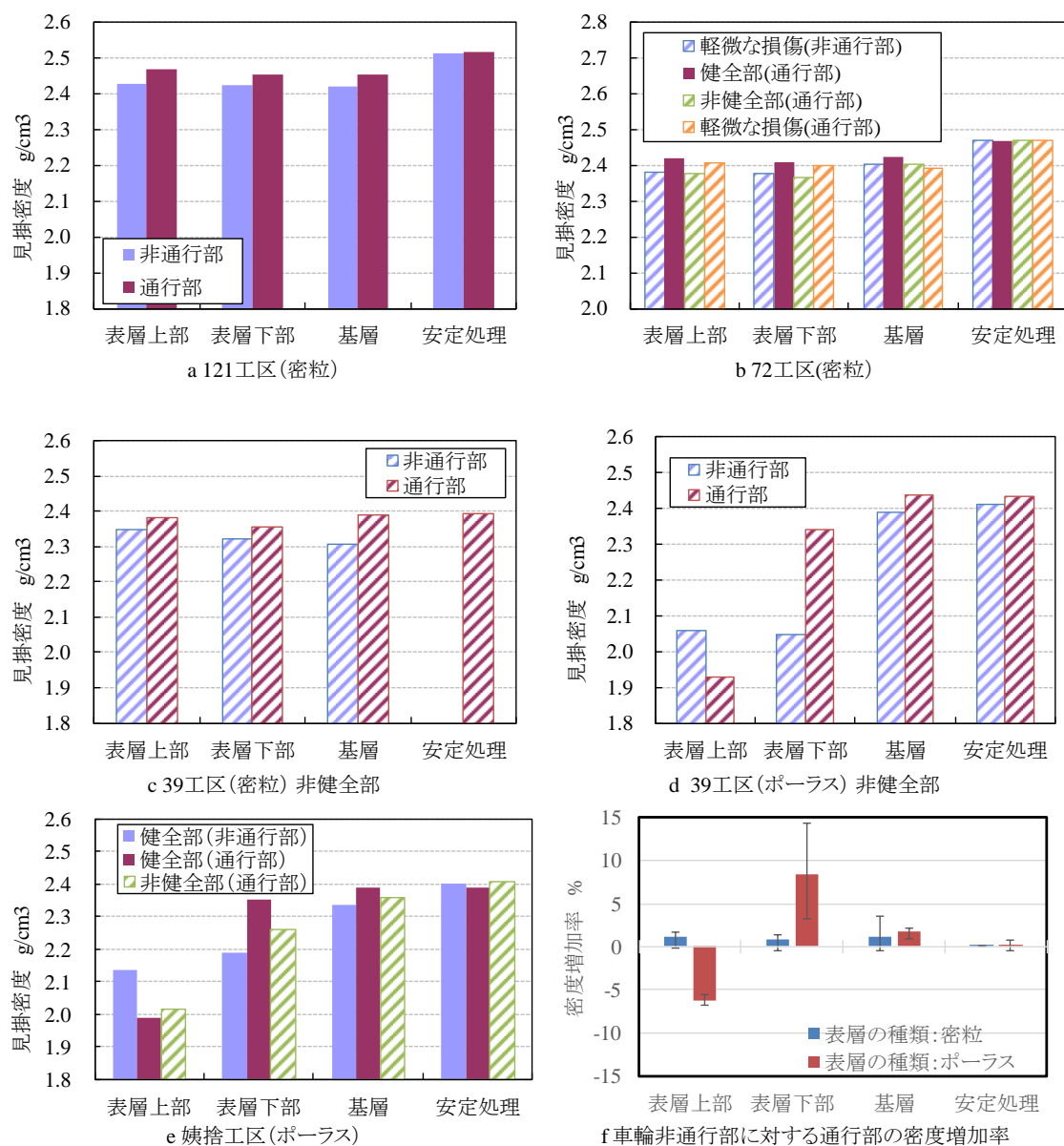


図 - 2.10 各工区の密度試験結果

2. 9 アスファルトの粘弾性状試験結果

(1) アスファルト舗装の深さ方向における針入度

図-2.11 の a から f に、各工区における表層からアスファルト安定処理層までの針入度試験の結果を示す。基層、安定処理については各部分で明確な差がなかったため、上段、中斷、下段の値を平均して示した。健全部は実線、非健全部は破線で示しており、表層が密粒度の場合は塗りつぶし、ポーラスの場合は白抜きとした。

121 工区では、表層近辺の針入度が低くなり、深さ方向に進むほど針入度が高くなっていることがわかる。

72 工区では、必ずしも表層の針入度だけが低いわけではなく、特にアスファルト安定処理の針入度が低い値を示していた。また、72 工区の非健全部（図中の No.4）では、全層で針入度が低い値であった。

39 工区の表層は、供用 7 年のポーラスと、供用 14 年および 19 年の密粒度に分かれており、ともに非健全部の車輪通行部と車輪非通行部より採取した。ここでは、ポーラスと密粒度ともに路肩部で表面からひび割れが発生しており、層間剥離も見受けられた。ここから抽出したアスファルト（図中の No.8, No.9）では、表層から安定処理層にかけて針入度が低下していた。ここでのアスファルト舗装は、供用期間が表基層と安定処理層とで異なり、劣化の進行程度は深さ方向で一律に比較できないが、供用 7 年のポーラスの針入度（図中の No.7）が、供用 14 年の密粒度の針入度（図中の No.11）と比較し、明らかに低下していることがわかる。

姨捨工区の表層はポーラスであり、健全部と非健全部より採取した。ここでは、表面にひび割れは発生していないが、底面では健全部、非健全部ともにひび割れが発生していた。ここから採取したバインダの針入度は、121 工区と同様に、舗装表面の針入度が低下しており、深さ方向に進むにつれて針入度が高くなっていた。

損傷状態や走行位置に着目すると、密粒度とポーラスともに、ひび割れがなく健全な場合

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

は、表層の針入度は、下部よりも上部のほうが低い値を示しており、ひび割れなどが生じていると、上部と下部であまり差がないことが確認された。これは、空気との接触により酸化劣化が進行するためと考えられる。車輪通行部と車輪非通行部において、表層混合物の針入度を比較した結果、舗装に破損が見られた箇所あるいはポーラスを用いた箇所では大きな差異は見られなかったが、健全部の密粒度では、既往の報告 [7] [15] と同様に車両非通行部のほうが、車両通行部と比較して針入度が低下していた。このことから、アスファルトの劣化が空隙率や損傷の有無に影響されていると考えられる。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

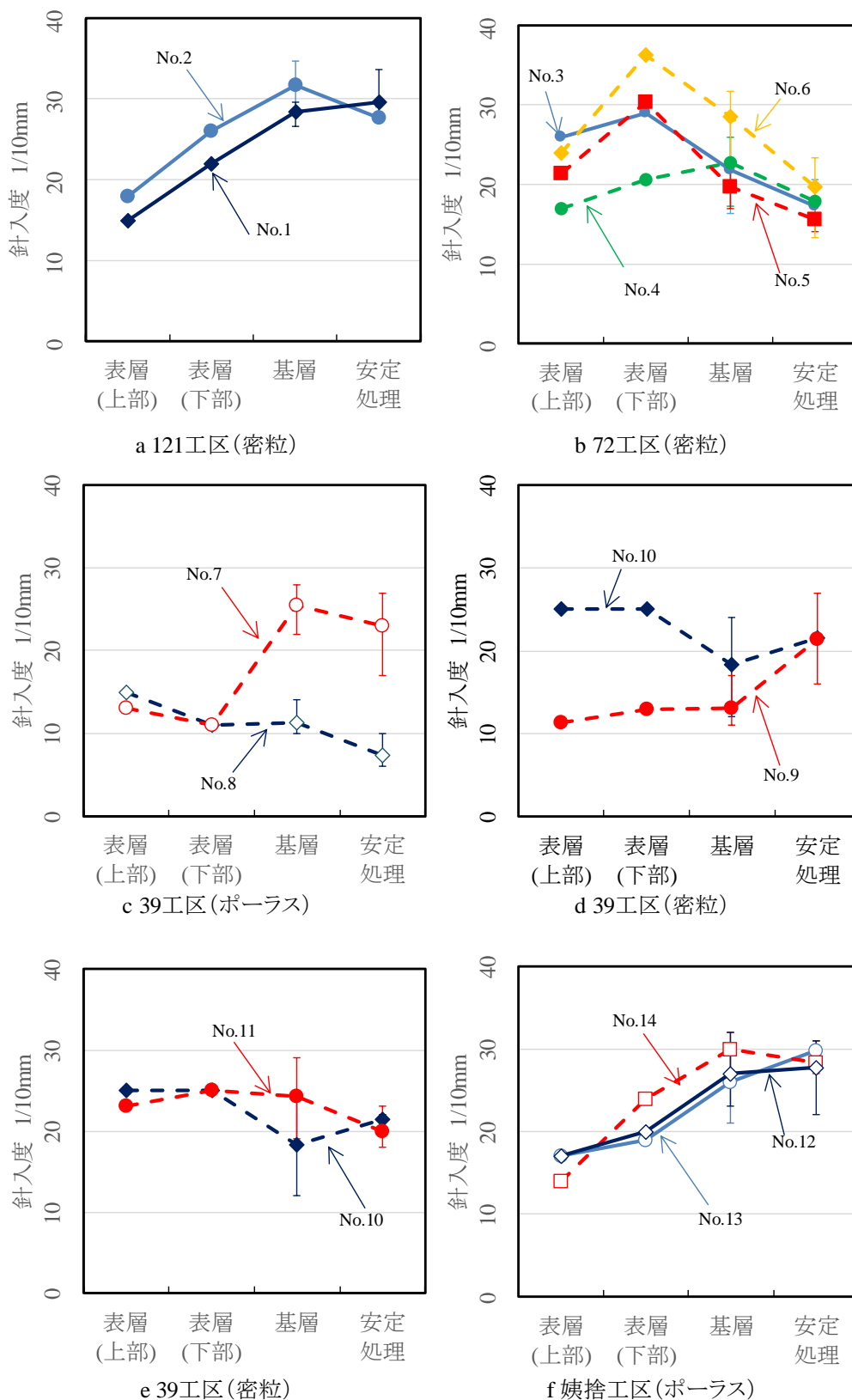


図 - 2.11 各工区における表層から安定処理までの針入度

(2) 供用年数と針入度の関係

図 - 2.12 に、表層混合物の上段と下段より採取したアスファルトの針入度と供用期間の関係について整理した結果を示す。

供用 7 年経過したポーラス混合物に用いられている改質 H 型の針入度は 11～24 (1/10 mm) であった。供用 19 年経過した密粒度混合物におけるアスファルトの針入度は 13～29 (1/10 mm) であった。これらのことから、供用年数は 10 年以上異なるが、針入度は同程度となっており、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。

図 - 2.13 に、基層と安定処理混合物について、健全部と非健全部に分けて供用年数と針入度の関係を整理した結果を示す。予想どおり、健全部では針入度はあまり低下していないが、非健全部では針入度が低下していることが確認された。このことから、アスファルトの劣化は、混合物の損傷の有無によりその進行が異なる可能性がある。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

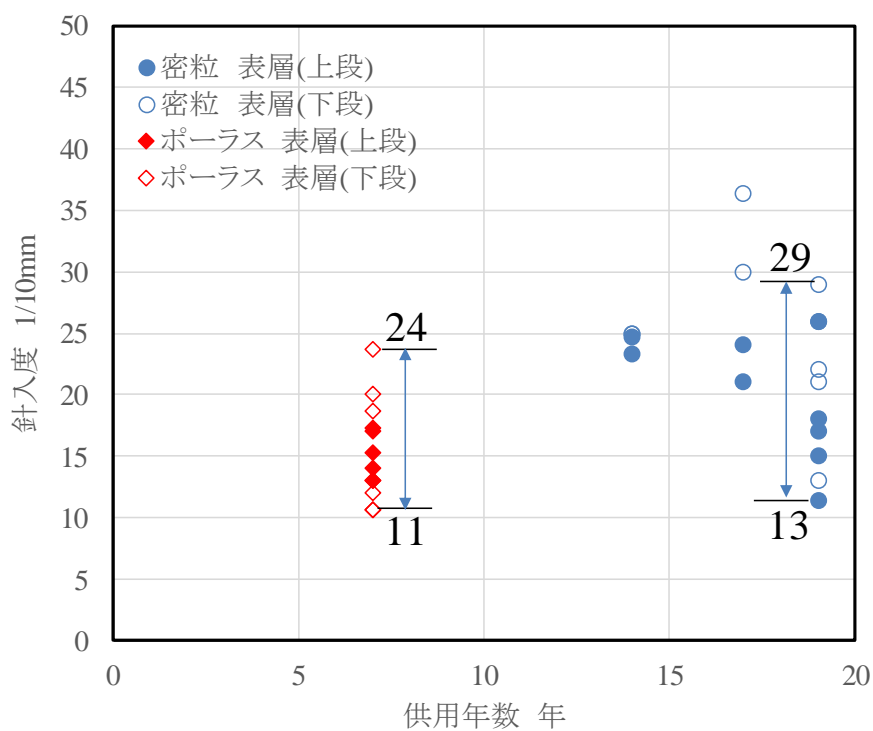


図 - 2.12 表層混合物から採取したアスファルトの針入度と供用年数の関係

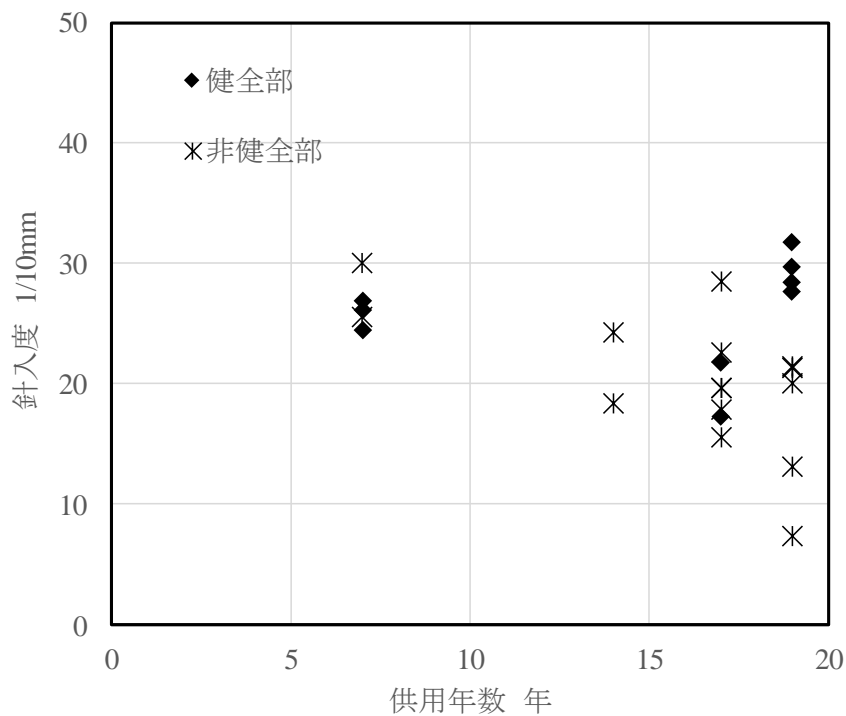


図 - 2.13 基層および安定処理混合物から採取した

アスファルトの針入度と供用年数の関係

(3) 赤外分光分析によるアスファルトの劣化評価

図 - 2.14 の a から f に、各層より採取したアスファルトの 1700 cm^{-1} の吸光度を示す。全ての工区で針入度と同様な傾向にあるが、吸光度は、酸化劣化が進行するほど高い値となるため、針入度と対称のグラフとなっている。図 - 2.15 に、ここで示した吸光度と針入度の関係を示す。

ストアスあるいは改質アスファルトに関わらず、針入度が低下するほど吸光度は高い値を示すことがわかる。これは、酸化劣化が進むにつれてアスファルトが硬化していることを示す。ポーラスから採取した改質 H 型の吸光度は、ストアスの同じ針入度における吸光度と比較して、低い値を示している。これは、供用年数がストアス混合物よりも短いことによる影響と推測される。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

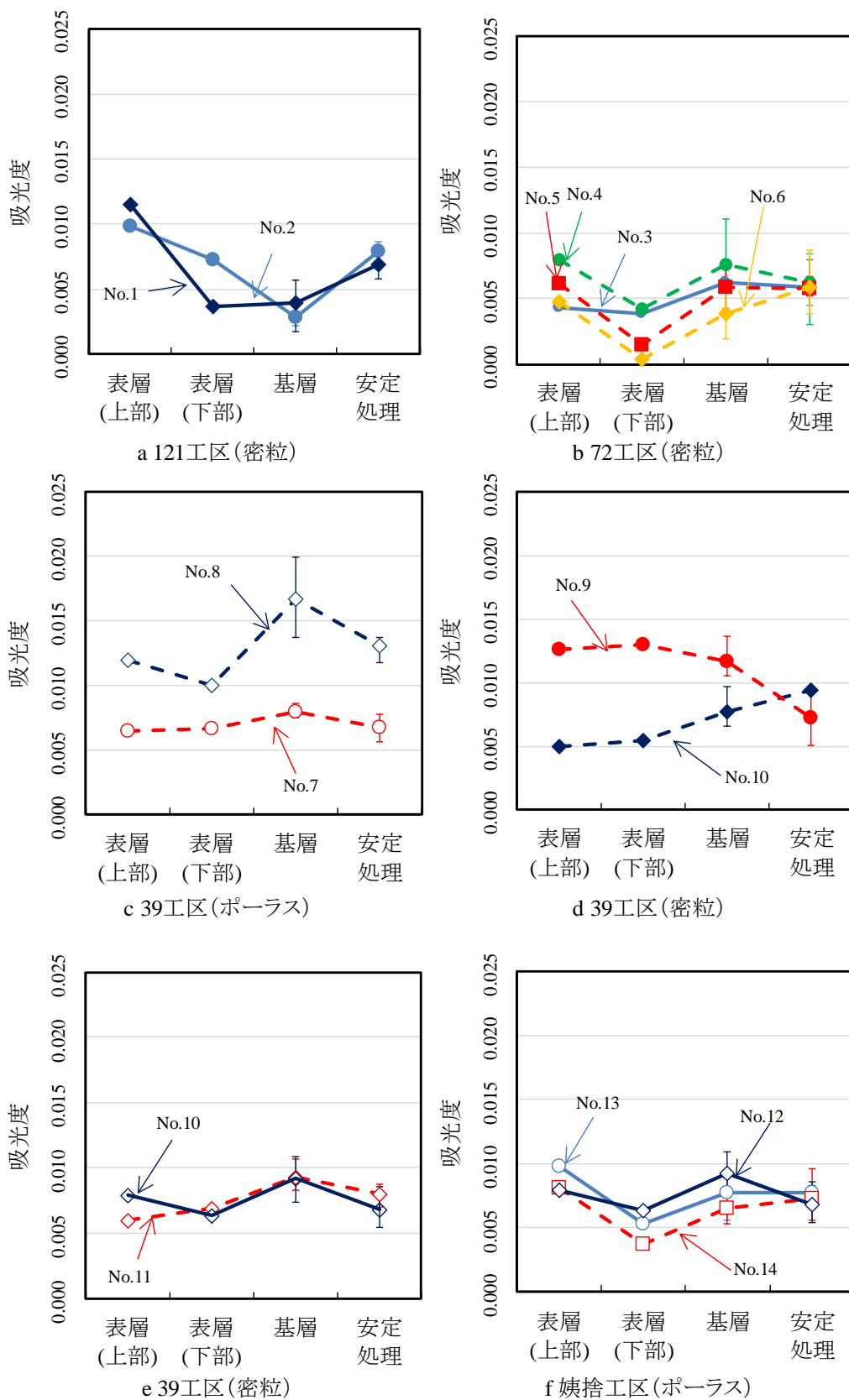


図 - 2.14 各工区における表層から安定処理までの吸光度

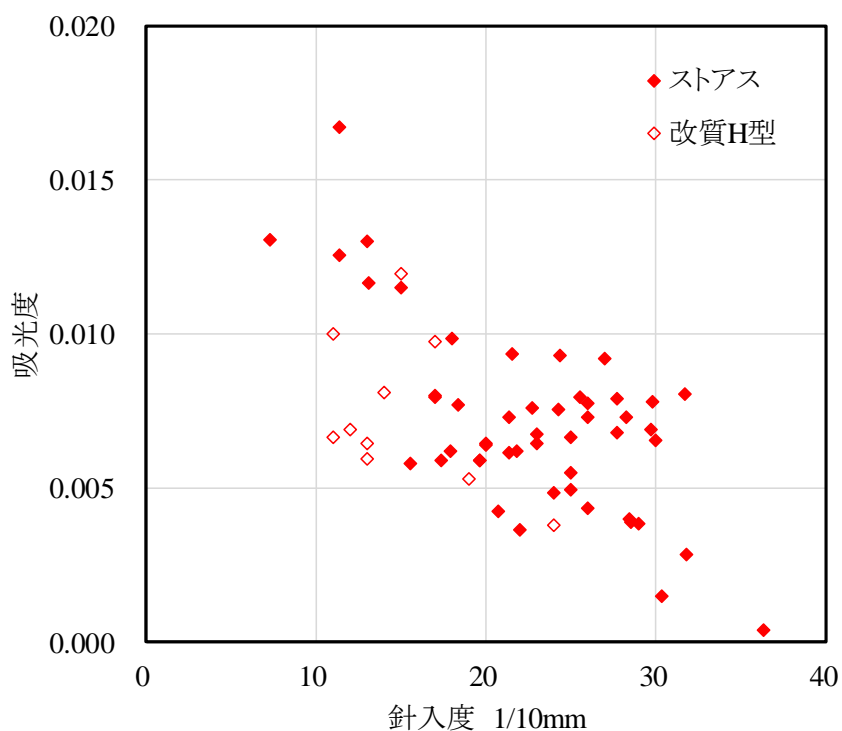


図-2.15 針入度と吸光度の関係

(4) 針入度と伸度, 軟化点の関係について

図 - 2.16 に, 抽出したアスファルトの針入度とそれぞれの伸度や軟化点との相関について検討した結果を示す.

針入度が低下するにつれて, 軟化点は上昇し, 伸度は低下する傾向にある. ただし, 改質 H 型では, ストアスと同程度の針入度のときの伸度が比較的高いことが確認された. これは, 改質 H 型に含まれる改質材がアスファルトの伸び性状に寄与しているものと考えられる.

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

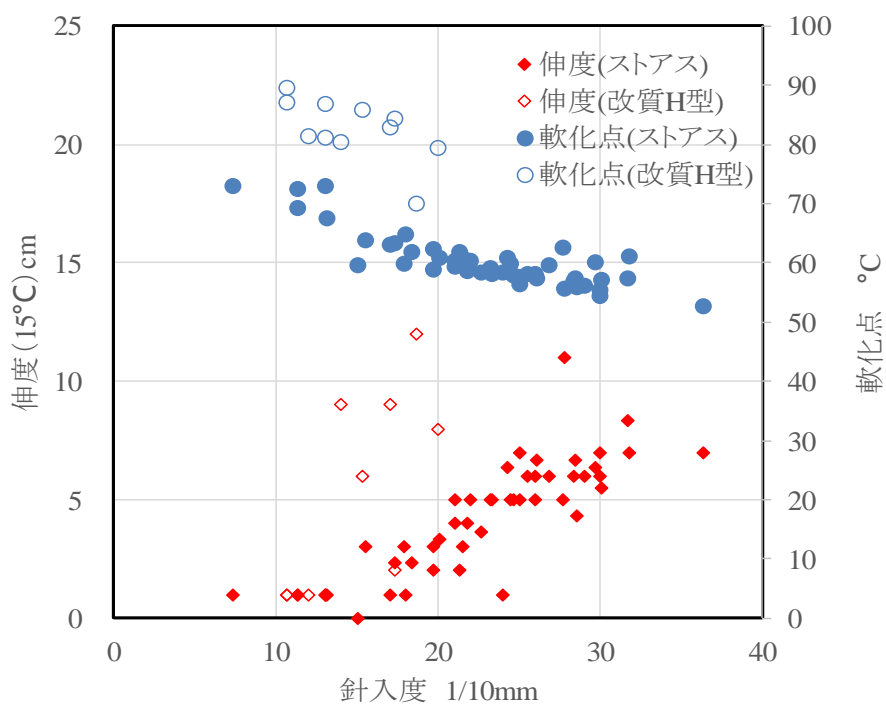


図 - 2.16 抽出したアスファルトの針入度と伸度・軟化点の関係

(5) アスファルトのスティフネスの測定結果

図-2.17 にノモグラフから推定した回収アスファルトのスティフネスと DSR 試験より算出した複素せん断弾性率の関係を示す。

ここでは、ノモグラフから得たスティフネスと比較するため、DSR 試験の測定結果から、荷重時間を 0.1 秒、1 秒、10 秒とした時の各パラメータを抽出し比較することとした。図中の破損が見られた試料から採取した回収アスファルトの各パラメータは、測定温度 20°C、荷重時間 0.1 秒の時の値を示している。

改質 H 型の結果を除けば、ノモグラフで推定した回収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は、供用年数、荷重時間あるいは測定温度に関わらず非常に高い相関を示すことが確認できた。このことから、ストレートアスファルトであれば、針入度と軟化点の関係からノモグラフを用いて推定されるアスファルトのスティフネスが、非常に高い精度でアスファルトの粘弾性状を表していることが分かる。

図-2.18~2.20 に DSR 試験より得られた各弾性率および位相角の関係を示す。

複素せん断弾性率が高くなるに従い、位相角は低下する。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。

損傷が見られた試料から採取した回収アスファルトの測定温度 20 °C、荷重時間 0.1 秒の時のアスファルトのスティフネス、複素せん断弾性率、貯蔵せん断弾性率、損失せん断弾性率および位相角に着目すると、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。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

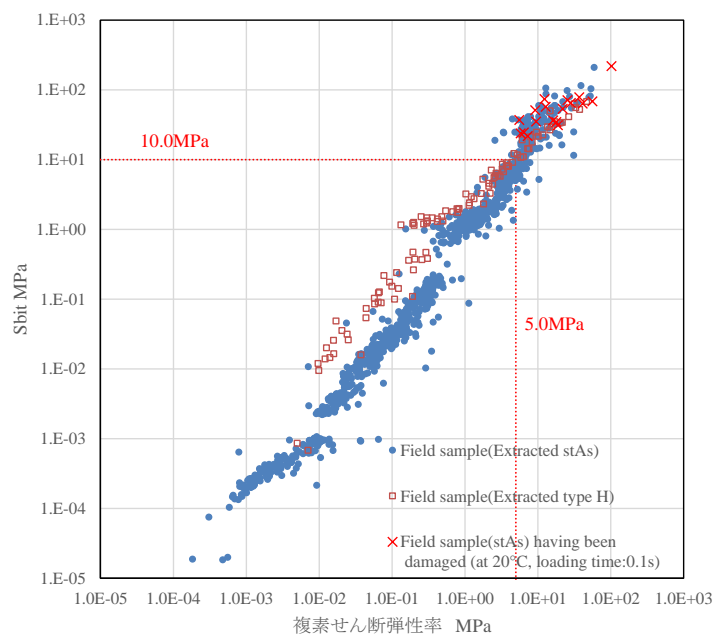


図-2.17 ノモグラフから得たアスファルトのスティフネスと
DSR 試験から算出した複素せん断弾性率の関係

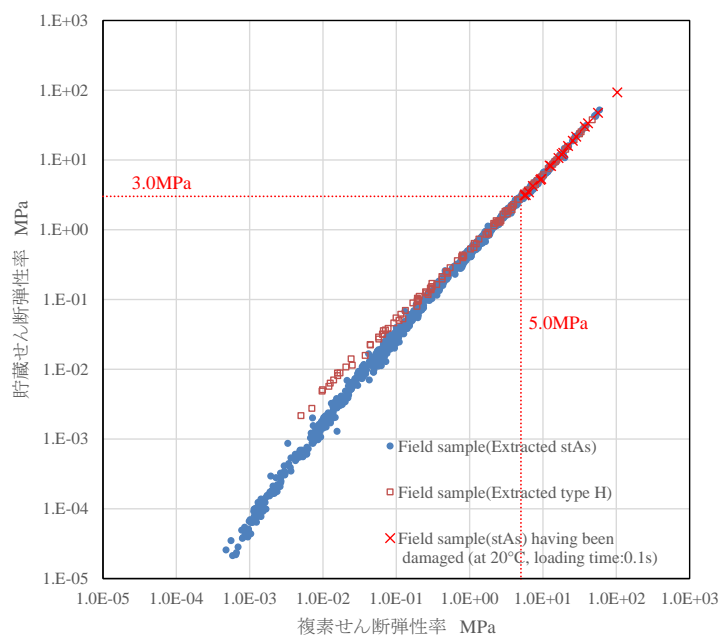


図-2.18 複素せん断弾性率と貯蔵せん断弾性率の関係

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

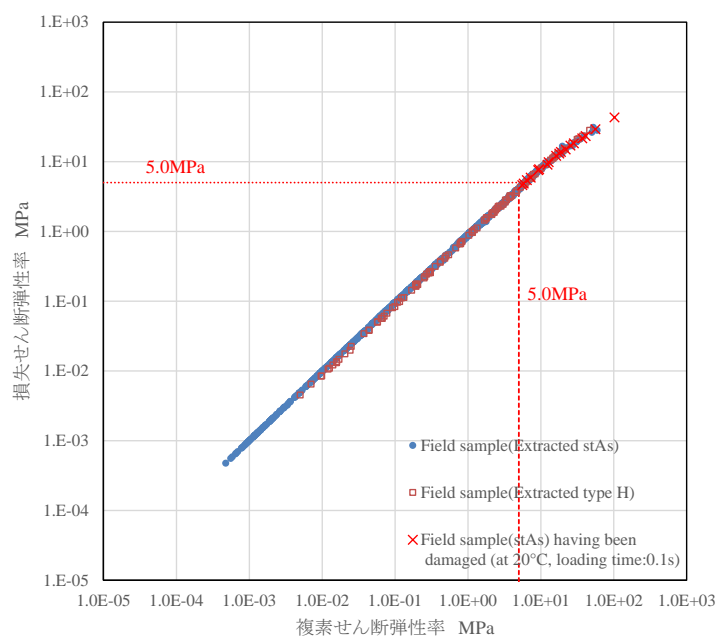


図-2.19 複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係

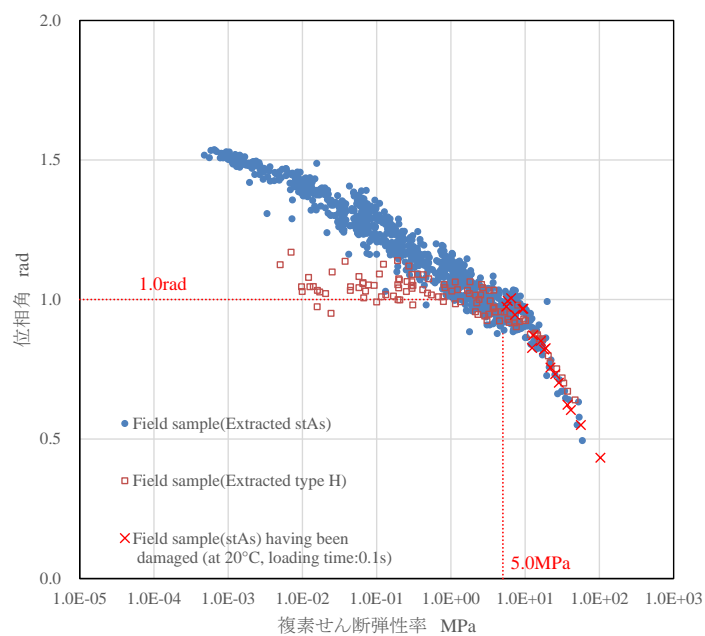


図-2.20 複素せん断弾性率と位相角の関係

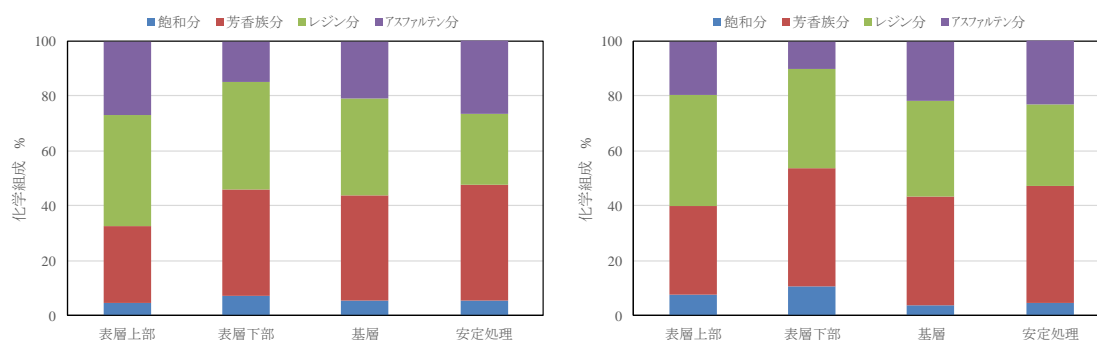
第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

(6) 組成分析結果

図 - 2.21～2.25 にイアトロスキャンによるアスファルトの組成分析結果を示す。

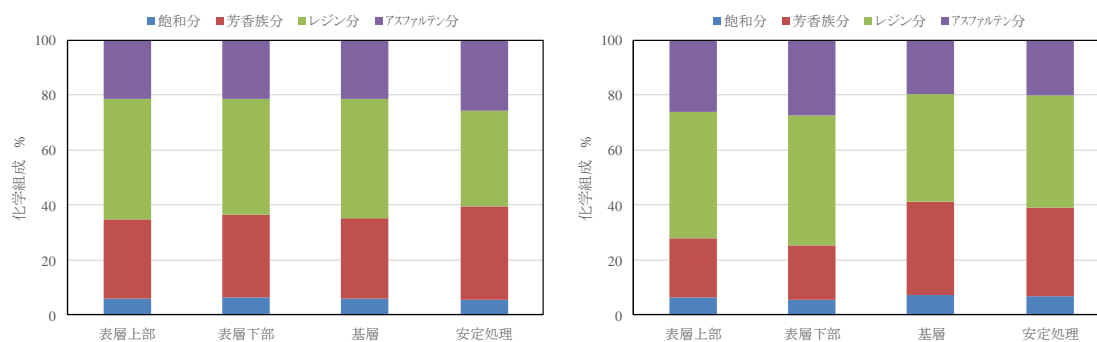
一般的に、アスファルトが劣化すると飽和分や芳香族分が低下し、レジジン分やアスファルテン分が増加することが知られている。

試験結果を見ると、概ね表層上部と比較し、内部のほうが飽和分や芳香族分の割合が高い傾向にあり、アスファルト舗装上部のほうが下部よりも組成が変化しやすいと考えられる。



(121 工区 左：車両非通行部， 右：車両通行部)

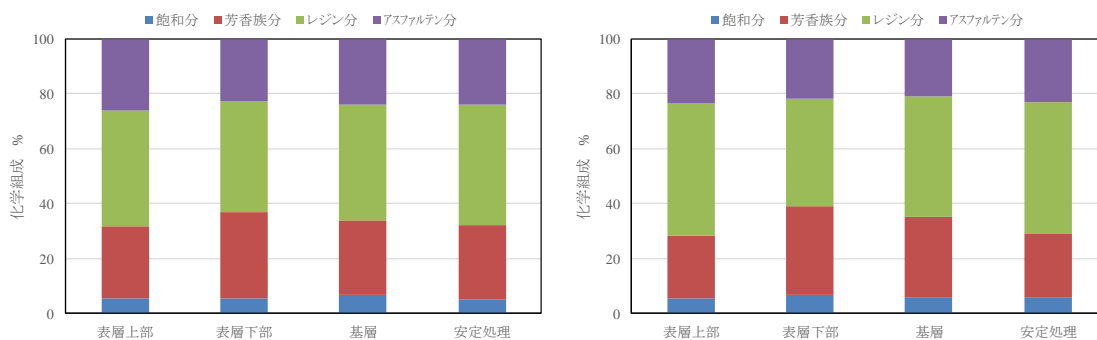
図-2.21 イアトロスキャンによる組成分析結果



(72 工区 左：車両通行部 (A)， 右：車両通行部 (D))

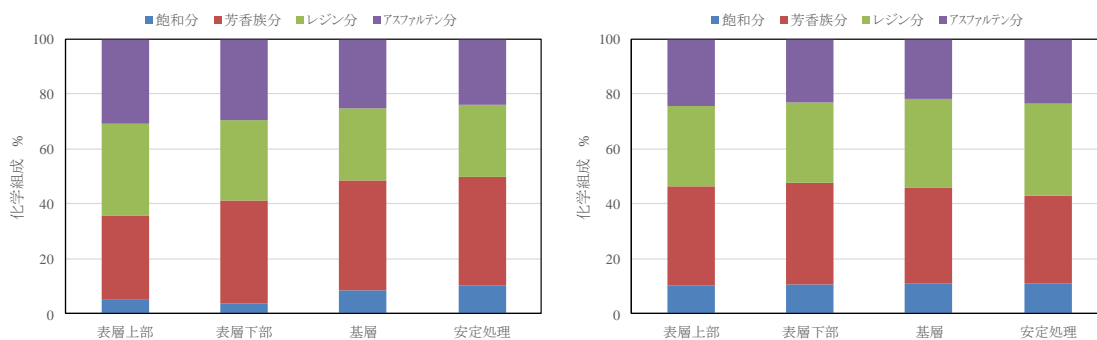
図-2.22 イアトロスキャンによる組成分析結果

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果



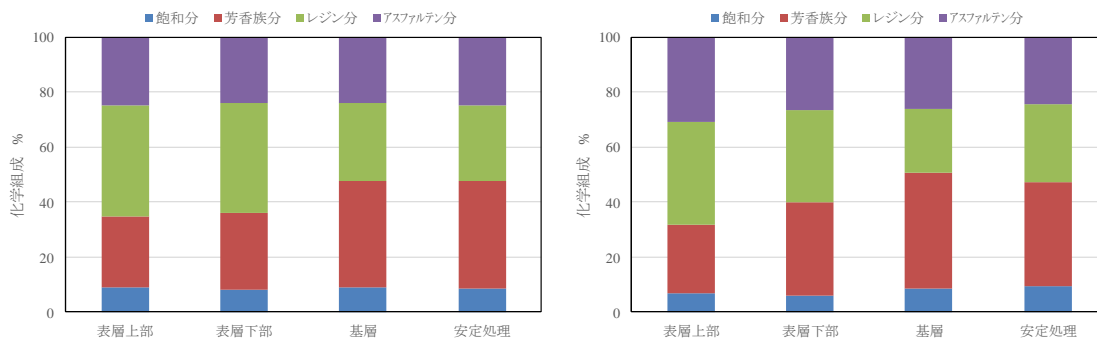
(72 工区 左：車両通行部 (C), 右：車両非通行部 (C))

図-2.23 イアトロスキャンによる組成分析結果



(39 工区 左：車両通行部 (ポーラス), 右：車両非通行部 (密粒))

図-2.24 イアトロスキャンによる組成分析結果



(娯捨工区 左：車両通行部 (A), 右：車両非通行部 (D))

図-2.25 イアトロスキャンによる組成分析結果

2. 10 第2章のまとめ

第2章で得られた知見を以下にまとめる。

- 骨材粒度について調査した結果、車輪走行の有無や損傷の有無による骨材粒度の変化について明確な傾向は見られなかった。ポーラスでは、特に4.75mm以下の通過質量百分率が上昇していた。これは交通車両による粗骨材の細粒化や周辺部からの堆積物による影響と考えられる。
- アスファルト量について調査した結果、車輪通行部の有無について比較すると、一部を除き車輪通行部のアスファルト量が全層においてわずかに少なくなっており、その影響は安定処理層が最も大きい結果となっていた。
- 密度試験を行った結果、混合物の種類によりその傾向は異なるが、車輪走行の有無により表層の密度は変化しているが、安定処理層ではほとんど影響を受けていないことが確認された。
- 表層の種類に着目すると、密粒度では表層、基層ともに空隙率で2%程度車輪通行部のほうが上昇しているのに対し、ポーラスでは表層上部と下部でその傾向が異なり、上部では密度が低くなり、下部で密度が高くなっていた。これは車輪走行により、表面では骨材飛散することにより密度が低下し、内部では圧密され空隙が低くなっていることが考えられる。
- アスコンについて抽出試験を行い、アスコンに含まれるアスファルトについて調査した結果、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。
- 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。
- 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

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

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。

- 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。
- 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。さらに、複素せん断弾性率が10MPa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、10MPa以上であれば、回収アスファルトと回収改質H型でほぼ同様な値で推移していた。
- 損傷が見られたアスファルトのスティフネスは10MPa以上、複素せん断弾性率および損失せん断弾性率は5MPa以上、貯蔵せん断弾性率は3MPa以上、位相角では1.0rad以下の値であった。

第2章の参考文献

- [1] 高橋茂樹, 吉野公朗, 早川泰史, 原田秀一, 砂金克明: 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, 土木学会第68回年次学術講演会, pp.835-836, 2013.9.
- [2] 高橋茂樹, 舘岡豊, 吉野公朗: 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 - 主な知見 -, 土木学会第69回年次学術講演会, pp.1171-1172, 2014.
- [3] 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.
- [4] 平戸利明, 村山雅人, 姫野賢治, 高橋茂樹. 長期供用された高速道路で用いたアスファルトの気象劣化現象に関する調査結果, 土木学会舗装工学論文集.E1 (舗装工学) . Vol.70, No.3, pp.123-130, 2014.12.
- [5] 社団法人日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧 [第2分冊], 2007.
- [6] J.Puello, N.Afanasjeva, Malvarez: COLOMBIAN BITUMENS: RHEOLOGICAL AND FTIR ANALYSIS DURING THEIR ACCELERATED AGING, 4th Euroasphalt & Eurobitume, 2008.
- [7] 笠原靖, 植村正, 牛島幸司郎: 供用中におけるアスファルト舗装の老化の研究-アスファルトの劣化に及ぼす路面からの深さの影響-, 石油学会誌, pp.30-33, 1975.1.
- [8] 飯島尚, 小島逸平, 寺島憲一: アスファルト舗装用混合物の配合設計に関する幕張試験舗装の解析, 土木技術資料, pp.34-39, 1982.12.
- [9] W. Heukelom: Observations on the rheology and fracture of bitumens and asphalt mixes, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, pp.358-399, 1966.
- [10] C. VAN DER POEL: A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

and its Relation to Routine Test Date, Journal of Applied Chemistry, pp.221-236, 1954.

- [1 1] 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7 舗装工学の基礎, pp.33-34, 2012.
- [1 2] Van Dijk W. : Practical fatigue characterization of bituminous mixes, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.44, pp.38-74, 1975.
- [1 3] 姫野賢治：アスファルト舗装の疲労ひび割れ破壊に関する基礎的研究, 博士論文, 東京工業大学, 1986.
- [1 4] 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社：設計要領第1集舗装編
- [1 5] 立石大作, 新田弘之, 佐々木巖, 坂本浩行：供用劣化後のアスファルト性状と促進劣化試験の適用性, 土木技術資料, pp.38-43, 1998.

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果