

[論文要旨] 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

Effect of Long-term Aging on Rheological Properties of Asphalt

都市環境学専攻 平戸 利明

Toshiaki HIRATO

第1章 総論

アスファルト舗装の理論設計法では、交通荷重による繰返し载荷あるいはアスファルトの環境劣化を考慮して、実道に合わせて設計されているが、アスファルトの粘弾性状の変化がもたらすアスコンの破損への影響については明確にされていない。アスコンには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。近年では、アスファルトを繰返し再生して道路舗装に利用しているが、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。アスファルト舗装の供用性能は、交通条件や環境条件により大きく左右されるため、一様に評価することは難しいが、供用されることによるアスファルトの粘弾性状の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を再生利用する技術確立の意義は極めて高い。

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スティフネスを測定した。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劣化評価方法を提案した。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、粘弾性状を示すアスファルト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、縦表面ひび割れの発生要因の一つを明らかにした。

第2章 長期供用されたアスファルトの調査結果

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。しかし、既往の研究^{1), 2)}では、特にアスファルト安定処理層について詳しく調査された例はない。そこで、第2章では、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。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、それぞれの混合物に含まれるバインダ性状を調査した。

調査の結果、アスファルト舗装の内部、特にアスファルト安定処理用混合物においても、アスファルトは劣化しており、劣化進行の程度は、混合物の配合や損傷程度により異なっていた。さらに、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。また、**Table.1**に示す条件により Dynamic shear Rheometer (DSR) 試験を行った結果、損傷が見られた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以下の値を示すことが分かった。

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

3.1 促進劣化と現道から得られたアスファルトの粘弾性状の比較

現道から採取した試料と促進劣化試験後のアスファルトの性状を比較するために、ストレートアスファルトを用いて促進劣化試験を行った。使用したアスファルトは舗装用アスファルトとして一般的に使用されるストレートアスファルト60-80(以下、ストアス)とした。促進劣化試験として、回転式薄膜加熱試験(RTFOT:ASTM D 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:ASTM D 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。これらの試料を用いて粘弾性状の評価としてDSR試験を行った。

Fig.1にDSR試験より算出した全ての試験条件における複素せん断弾性率と損失せん断弾性率の関係を示す。

採取した試料はスライスしている最中に**Photo.1**に示すようにひび割れが生じたもの、あるいは原形をとどめることができないものもあった。図中の破損が生じた試料は、これらの破損した試料から回収したアスファルトの測定値を示している。

Table 1 DSR test conditions

Items	Contents
Test Temperature	20 °C, 40 °C, 60 °C
Frequency	0.1-100 rad/s
Radius of plate	8 mm
Thickness	1 mm
Strain	10 %



Photo.1 Damaged asphalt mixture

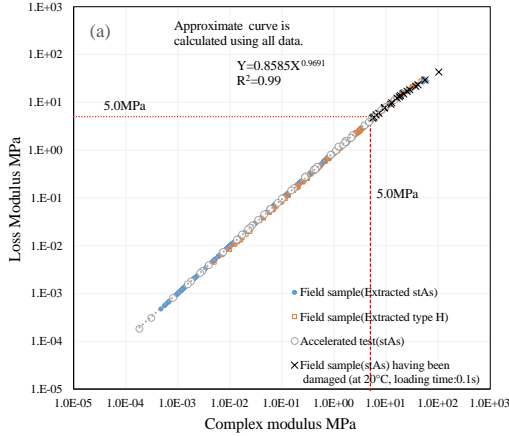


Fig.1 complex modulus and loss modulus of field-aged asphalt compared to asphalt after accelerated aging

DSR 試験より算出した損失せん断弾性率と複素せん断弾性率の関係を見ると、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。

3.2 アスファルトの劣化評価指標

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 Dijk³⁾、姫野ら⁴⁾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(1)式で表され、 $|E^*| = \sigma_0/\epsilon_0$ を(2)式に代入すると(3)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。

$$W_0 = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \sin \delta \quad (1)$$

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

$$E'' = |E^*| \cdot \sin \delta \quad (3)$$

$$W_0 = \pi \cdot \epsilon_0^2 \cdot E'' \quad (4)$$

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、(5)式が成立する。

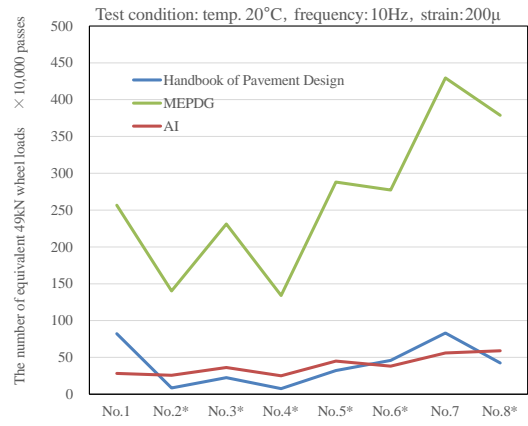
$$W = B \cdot N^Z \quad (5)$$

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

(4)式と(5)式を等値とすることにより、(6)式を得ることができる。



* Much cracking on the bottom face of the pavement.

Fig.2 Comparison of the number of equivalent 49kN wheel loads

$$N = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \pi \cdot \epsilon_i^2 \cdot E_i''}{B} \right)^{\frac{1}{Z}} \quad (6)$$

ここで、アスコンの破壊をアスファルトの破壊とみなし、さらにアスファルトのポアソン比 μ を0.5と仮定すると(6)式を(7)式のように表すことができる。

$$N = \left(\frac{\sum_{i=1}^N 3\pi \cdot \epsilon_i^2 \cdot G_i''}{B} \right)^{\frac{1}{Z}} \quad (7)$$

破壊に至るまでの载荷回数は材料固有と考えられる。アスファルトが劣化し損失せん断弾性率 G'' が高くなると、単位散逸エネルギー W_0 が大きくなり、破壊までの载荷回数は減少することとなる。つまり劣化によるアスファルト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低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℃)から高温(60℃)でかつ0.1 Hzから10 Hz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。

3.1にて、DSR 試験から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の関係が、アスファルトの種類や測定条件に関わらず一定の関係を示すことが明らかとなったことから、室内劣化試験によりこれらの関係を検証することで、アスファルトの劣化評価に対し有効な指標となる。

第4章 アスファルトのスティフネスから算出した許容 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 アスコンの許容 49 kN 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、Asphalt Institute (AI) の破壊規準式および Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (以下、MEPDG) の式を用いて比較した。許容 49 kN 換算輪数は、車輪通行位置における試験温度 20℃、载荷速度 0.1 秒の時の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。ここでは、ひずみ

ε を 200μ に設定した。

4.2 許容 49 kN 輪数の推定結果

Fig.2 に計算結果を示す。開削したアスコンの底面に生じているひび割れ箇所と許容 49 kN 換算輪数を照らし合わせて解析した結果、AI 式と舗装設計便覧の式では同程度の破壊回数のレベルとなったが、MEPDG では破壊回数が大きい。その傾向を比較すると、舗装設計便覧の式では、アスコン底面にほとんどひび割れの見られなかった No.1 と No.7 の値が大きかったのに対し、AI 式では傾向が異なる結果となった。これは、AI の式は、舗装設計便覧と比較し、アスコンのスティフネスの影響よりも飽和度の影響を高く設定されていることが要因と考えられる。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。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、明らかに底面でひび割れが見られなかった工区と一致したことから、アスファルトのスティフネス測定結果とアスコンのひび割れにおいて、非常に高い相関が見られる。このことから、アスファルトの性状を測定することによりアスコンの疲労状態を把握することができる。

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 繰り返し载荷によるアスコンの応力変化

アスファルト舗装の表面には、走行方向と同じ方向に表面ひび割れが生じる場合がある。このようなひび割れはセメントコンクリート舗装では通常見ら

れない。本現象について、室内実験による検討や理論解析などが行われている^{5),6)}が、原因は特定には至っていない。このような縦表面ひび割れの原因をアスコン特有であると捉え、タイヤの走行荷重によって生じる累積変形ではなく、Fig.3 に示すように、車輪荷重が通過してアスコン層が復元する際に表面に引張応力が作用し、ひび割れが生じる可能性について検討した。

評価方法は、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取得した。試験に用いた試験体は、平板状のアスコンから $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 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。

Table 2 に試験条件を示す。与えるひずみは当初 400×10^{-6} とした。比較として、セメントコンクリートに

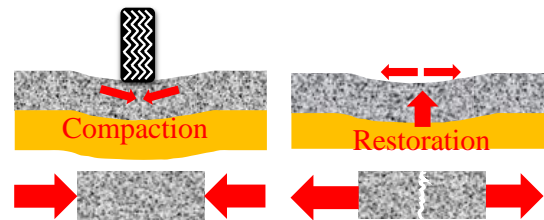


Fig.3 Image of the asphalt concrete layer

Table 2 Test condition

Items	Contents
Control	sin wave, 1Hz
Temp.	20°C
Dimensions	$\phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$
Strain amplitude	Cement concrete: 400×10^{-6} Asphalt concrete: 600×10^{-6}

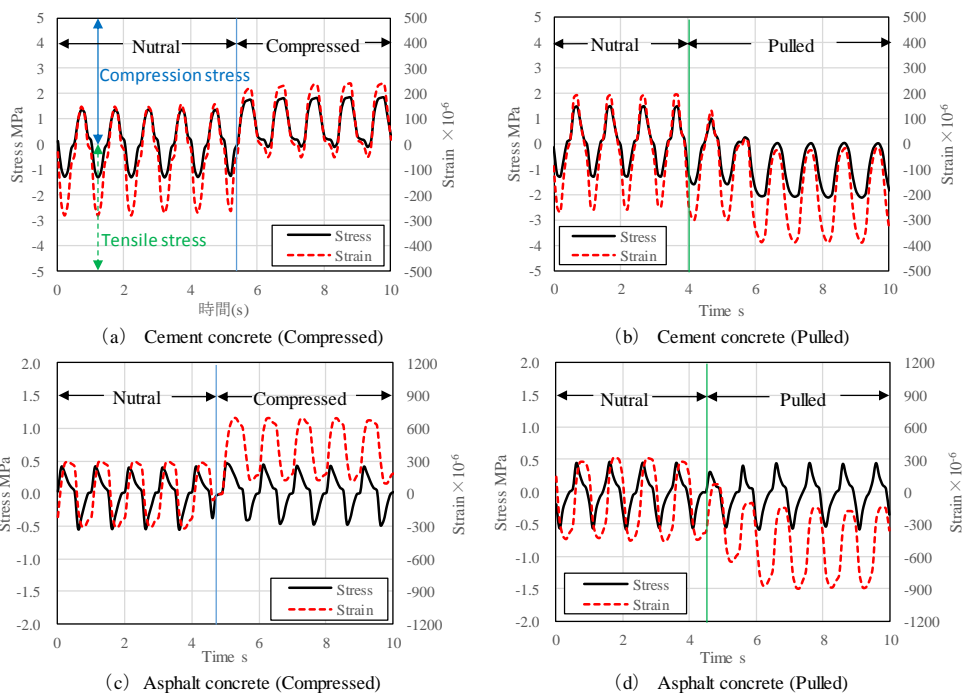


Fig.4 Change of stress occurred to each specimen in Push pull test

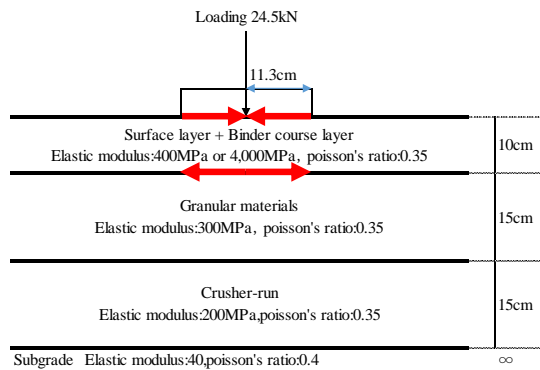


Fig.5 Analysis parameter

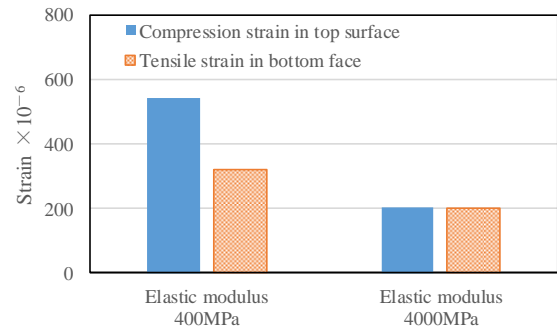


Fig.6 Analysis result of the strain

についても同様の試験を行った。試験の結果を Fig.4(a), (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。一方、アスコンでは、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、ひずみ振幅を 600×10^{-6} として繰返し载荷を与えることとした。Fig.4(c), (d)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。供試体に生じたひび割れ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。これらのことから、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。

Fig.4(c)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。

5.2 弾性解析によるひずみの比較

多層弾性解析プログラム「GAMES」を用いて Fig.5 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。アスコン層の弾性係数は、20℃で想定される 4000 MPa (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。

Fig.6 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、表面の圧縮のひずみのほうが底面の引張ひずみよりも絶対値が大きいため、元の形状に復元する際に応力緩和により引張応力が生じると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ものと考えられる。

第6章 結論

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) アスファルトの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る。

- 2) 破壊までの载荷回数の低下を抑制するためには、DSR 試験により得られるアスファルトの損失せん断弾性率が劣化により低下しないことが望ましい。
- 3) 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工区と一致したことから、アスファルトのスティフネスとアスコンのひび割れにおいて、高い相関が見られた。
- 4) 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返し载荷し、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取得した結果、アスコンは圧縮側および引張側に変位させると、即時に応力緩和してしまい、圧縮応力と引張応力が交互に生じる挙動に戻る。このことから、アスコンは、繰返し圧縮作用を受けた場合でも引張応力が生じる。
- 5) 一般的な舗装モデルによる理論解析を行った結果、夏期のアスコンのスティフネスが低い場合、車両走行により生じるひずみは、底面よりも表面のほうが大きい。そのため、元の形状に復元する際に応力緩和が働くと、アスコン表面に引張ひずみが生じ、タイヤ走行方向でひび割れが生じる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 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处置例について、道路建設，pp66-72，1980.2.
- 2) 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.
- 3) Van Dijk W.：Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proc. of AAPT, 44, pp.38-74，1975.
- 4) 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.
- 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., Canada/Japan Science Technology Consultation, pp.779-796，1984.