

# 舗装表面の経年劣化と温度変化がトップダウンクラックに及ぼす影響に関する研究

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻

○清水 孝史

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 正会員

高橋 修

## 1. はじめに

アスファルト舗装において、車両走行方向に生じるひび割れは、その進展形態によっていくつかの形式に分類されている。その一つであるトップダウンクラックは、アスファルトコンクリート（アスコン）層の表面から底面に向かって進展するひび割れである。その発生要因には、アスコンの応力緩和や経年劣化、温度勾配などが関係することが経験的に知られている。しかし、これらの要因が発生メカニズムにどのように影響しているのかは解明されてない。

そこで本研究では、トップダウンクラックの発生メカニズムを明らかにすることを目的として、既往の研究で得た知見から発生メカニズムを仮定し、その仮定を室内試験と数値解析によって検証した。室内試験では応力緩和性状試験と繰返し曲げ試験を実施し、数値解析では多層弾性理論に基づくアスコン層の力学挙動を解析して、影響因子とされる経年劣化と温度変化がアスコン層で発生するトップダウンクラックに与える影響について検討した。

## 2. トップダウンクラックに関する既往の研究

トップダウンクラックの重要な発生因子の一つとして、アスコン層の応力緩和が知られている。平戸らは、Push-Pull 試験を実施して応力緩和によるアスコンの応力挙動について検討した<sup>1)</sup>。この試験ではセメントコンクリート（セメコン）とアスコンの2種類の供試体を用いて、繰返し載荷によって圧縮作用のみを与えた場合の応力変化を比較した。セメコン供試体には圧縮応力のみが作用し、弾性的な挙動を呈したのに対し、アスコン供試体には圧縮応力と引張応力が交互に作用して、粘弾性的な挙動を示した。また、アスコン供試体には圧縮変位のみを与えたにも関わらず、試験終了時に中央部からひび割れが生じたことから、トップダウンクラックにはアスコンの応力緩和が影響することを明らかにした。

図-1 は、舗装に車輪が載荷した場合と除荷した場合の発生応力を模式的に示したものである。(a) の

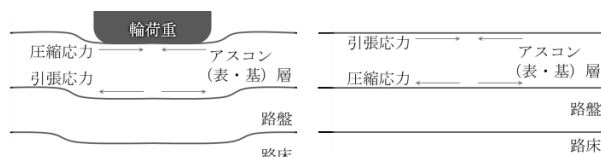


図-1 輪荷重が載荷した場合と除荷した場合の応力

ように輪荷重が作用した場合、アスコン層の表面で圧縮応力、底面で引張応力が生じる。その直後、輪荷重が作用している間でも、応力緩和によってアスコン層内のこれらの応力は小さくなる。輪荷重が除荷した後、(b)のようにアスコン層には路盤・路床から上方向に押し戻す復元力が生じる。この時点でアスコン層表面に発生していた圧縮応力が大きく緩和していると仮定すれば、表面では引張応力が作用することになる。このような状況を本研究におけるトップダウンクラックの発生メカニズムと考えた。

## 3. アスコン層の経年劣化と温度変化が応力緩和性状と疲労破壊抵抗性に及ぼす影響

### (1) アスコンの促進劣化方法と劣化程度

実舗装と同様にアスコン層表面からの劣化を再現するため、温度 110℃で保持した空気高温槽内に作製したホイールトラッキング (WT) 試験用供試体を型枠ごと放置し、アスコンに加熱促進劣化を施した。なお、アスコン種は密粒度 13 とし、バインダにはストレートアスファルトを使用した。

バインダ性状をもとに、促進劣化の程度と屋外暴露期間を対応づけるため、促進劣化を施したアスコンから回収したバインダに対して、針入度試験と軟化点試験を行った。試験結果を図-2 にまとめて示す。促進劣化日数が多いほど針入度は低下し、軟化点は上昇しており、バインダの粘性低下や脆化が確認できる。これらの試験結果より、促進劣化期間 4 日は屋外暴露の約 2 年、8 日は約 4 年にそれぞれ相当することがわかる。

### (2) アスコンの劣化と温度変化が応力緩和性状に及ぼす影響

**a) 応力緩和性状試験の実施要項**

荷重載荷時にアスコン層表面に生じる圧縮応力が応力緩和によって減少することを確認するため、応力緩和性状試験を行った。試験では、アスコン供試体に破壊しない範囲内で変形を与え、その後変形を一定に保持した状態で応力の経時変化を測定した。

本試験で用いる評価指標は、発生応力が変形を保持した時点の応力値  $\sigma_{max}$  から応力緩和によってその  $1/e$  ( $e=2.718\cdots$ ) に低下するまでの所要時間とし、その値を応力緩和時間  $t_0$  と定義した。応力緩和試験において、アスコンに与える変形量は、事前の一軸圧縮試験で求めた破壊時ひずみの 10% とした。ここではこのひずみを「試験ひずみ」と称する。応力緩和試験の条件を表-1 に示す。

**b) 試験結果および考察**

試験温度 30°C の条件において、各促進劣化日数での試験ひずみおよび応力緩和時間  $t_0$  の結果を図-3 に示す。試験ひずみと  $t_0$  のいずれにおいても促進劣化を施したことによる差異が見られない。そのため、圧縮作用に対しては、経年劣化による応力緩和への影響はかなり小さいものと評価される。

促進劣化日数 0 日の条件において、各試験温度での試験ひずみおよび  $t_0$  の結果を図-4 に示す。脆化点よりも高い温度では試験ひずみが大きく、 $t_0$  がかなり小さい値であり、常温域の 20~30°C では応力が急激に緩和する。

**(3) アスコンの劣化と温度変化が疲労破壊抵抗性及ぼす影響**

**1) 繰返し曲げ試験の実施要項**

アスコン層の劣化と温度の変化が疲労ひび割れの発生に及ぼす影響を確認するため、これらの条件を変化させた繰返し曲げ試験を行った。試験方法および結果の整理は、舗装調査・試験法便覧の「B018® アスファルト混合物の繰返し曲げ試験方法」に準拠した。ここでの試験条件を表-2 に示す。

**2) 結果および検討**

各温度条件における促進劣化の程度と破壊回数の関係を図-5 に示す。破壊回数は、試験温度が低いほど、また促進劣化日数が多いほど少ない。これは、

経年劣化によってアスコンのバインダが脆化したことにより、疲労破壊抵抗性が低下したものと考えられる。

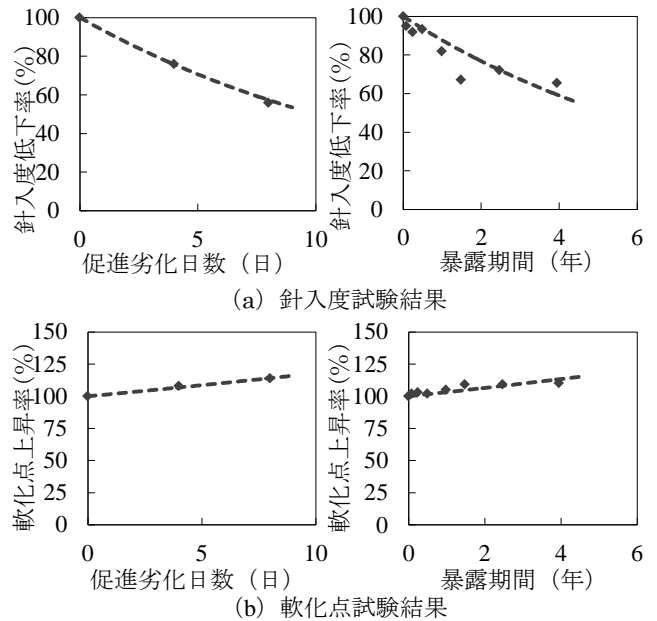


図-2 バインダ試験結果

表-1 応力緩和性状試験の条件

項目	条件
試験温度 (°C)	0, 10, 20, 30
載荷速度 (mm/分)	1.0
促進劣化日数 (日)	0 (新規), 4, 8

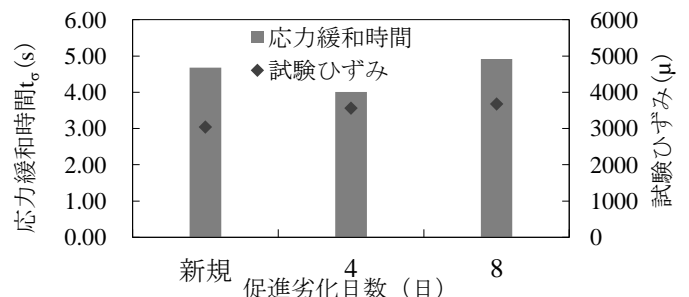


図-3 各促進劣化日数での試験ひずみおよび応力緩和時間

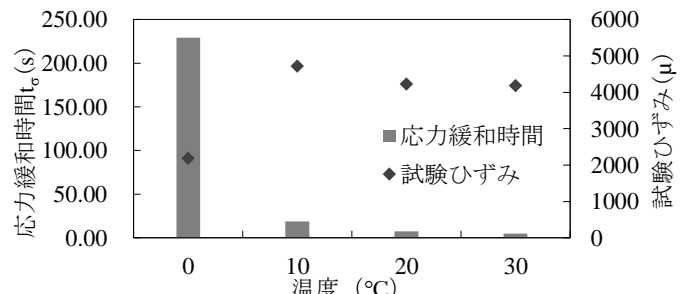


図-4 各試験温度での試験ひずみおよび応力緩和時間

表-2 繰返し曲げ試験の条件

項目	試験条件
ひずみ (μ)	300
振動数 (Hz)	5
温度 (°C)	-10, 0, 15
促進劣化日数 (日)	0 (新規), 4, 8

#### 4. 多層弾性解析による表面引張応力の推定

##### (1) 解析概要

第2章で記したトップダウンクラックの発生メカニズムの仮定、および第3章(2)節で得た応力緩和性状の結果を踏まえ、輪荷重によってアスコン層底面に発生する引張応力、および復元力によってアスコン層表面に発生する引張応力を推定、比較することで、トップダウンクラックが生じる可能性を検討した。

輪荷重によってアスコン層内に生じる応力およびひずみの解析は、多層弾性構造解析プログラムのGAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を使用した。

##### (2) 復元力による応力の考え方

復元力によってアスコン層が変形前の状態に戻る際の表面に発生する引張応力は、以下のような仮定に基づく簡易的な計算によって求めた。

変形が戻る直前に圧縮応力が100%緩和して消失したものとみなせば、本解析では舗装構成層を弾性体と仮定していることから、アスコン層が変形前の状態に復元するためには、アスコン層表面には圧縮応力と絶対値が等しい引張応力が発生するはずである。応力緩和の程度が100%より小さい場合は、その分だけ圧縮応力が残留し、アスコン層表面の引張応力は小さくなる。そして、アスコン層底面には、同様に変形の復元に伴って圧縮応力が発生する。

##### (3) 解析条件

本解析に用いた舗装構造(層厚の構成)は、舗装設計施工指針<sup>2)</sup>に記載されている交通量区分がN5とN7のモデルとした。表-3に解析条件を示す。

アスコン層内は深さ方向に温度勾配があるため、アスコン層を1cm厚ごとに分割し、温度によって弾性係数が異なることを考慮した。アスコン層内の温度勾配はザイナルらが提案した推定式<sup>3)</sup>より選定し、永江ら<sup>4)</sup>が提案した各温度に対するアスコンの弾性係数を用いてアスコン層の弾性体モデルを決定した。図-6に本解析で用いたアスコン層の温度勾配を、式(1)に永江らが提案したアスコンの温度Tと弾性係数Eの関係を表す回帰式をそれぞれ示す。

$$E = 10^{3.91+0.706\{(20-T)/T\}} \quad (1)$$

解析における応力緩和の影響、すなわち残留応力の程度は、輪荷重の荷重時間と第3章(2)節の試験結果から推定した。荷重時間は岳本らの研究による車両速度と輪荷重荷重時間の関係<sup>5)</sup>から決定した。そして、応力緩和性状試験の結果からその荷重時間に対応する応力低下から残留応力を選定した。

なお、実舗装では表面温度が60℃以上に達するため、応力緩和性状試験の試験温度よりも高温時の応力状態を推定する必要がある。そのため、試験結果より各温度条件における応力とひずみの比から緩和弾性率を求め、これらに時間温度換算則を使ってマスターカーブを作成し、マスターカーブから高温時における応力の経時変化を推定した。図-7にマスターカーブを、表-4に以上のプロセスで推定した車両速度30 km/hの場合の荷重時間およびその残留応力をそれぞれ示す。

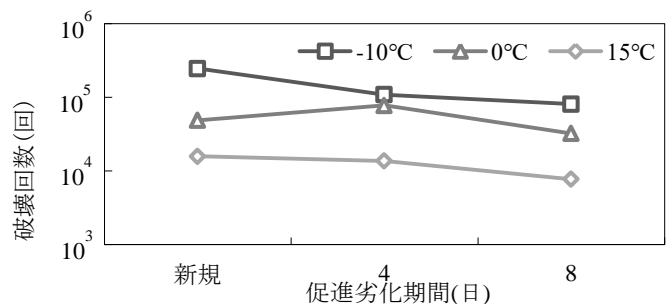


図-5 促進劣化日数と破壊回数の関係

表-3 アスコン層の解析条件

項目	条件
対象とする層	表・基層
層厚のモデル	N5, N7
表・基層の表面温度(℃)	0, 20, 40, 60

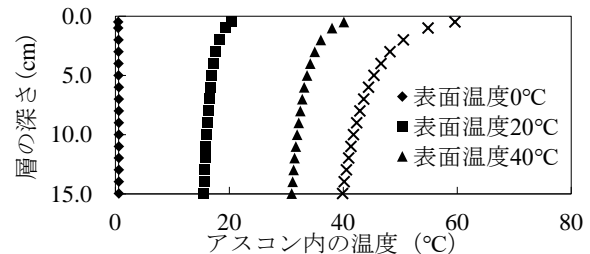


図-6 アスコン層の温度勾配

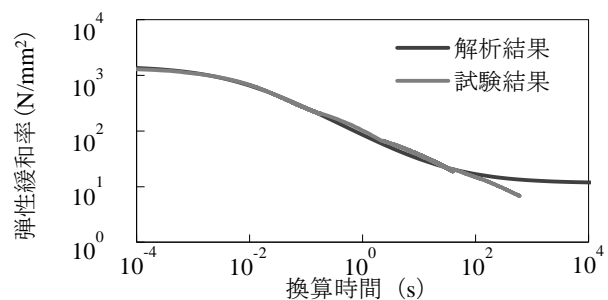


図-7 マスターカーブ

#### (4) 解析結果および考察

図-8 に輪荷重作用時のアスコン層表面に生じる圧縮応力の解析結果、図-9、図-10 に N5, N7 の舗装構造で輪荷重および復元力により発生する引張応力の解析結果をそれぞれ示す。これらの交通量区分ごとの舗装モデルについて、トップダウンクラックと温度の関係について考察する。

2つの舗装モデルにおいて、アスコン層表面に発生する圧縮応力は設計交通量が少ないN5のほうがN7よりも大きい。また、温度条件が高温になると、アスコン層の弾性係数が小さくなるため、圧縮応力が小さくなる。

アスコン層の表面と底面に発生する引張応力の傾向は、N5とN7の構造で大きな差異はなく、低温では表面と底面で引張応力に差はないが、アスコン層の温度が高くなるにつれて、引張応力に大きな差が見られ、表面に大きな引張応力が生じる。このことから、高温条件ではボトムアップクラックよりもトップダウンクラックのほうが発生しやすいものと推測される。

#### 5. まとめ

本研究では、既往の研究で得られているトップダウンクラックの発生メカニズムに基づき、室内試験と数値解析によって経年劣化と温度変化がアスコン層のトップダウンクラックに与える影響について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 経年劣化による応力緩和性状への影響は小さいが、温度変化の影響は大きい。特に脆化点よりも高い常温域では、温度が高いほど応力緩和の程度が高い。
- 2) アスコンの疲労破壊抵抗性は、劣化程度および温度変化によってかなり異なる。劣化が進行し、高温状態ほど疲労破壊抵抗性が低下することから、アスコン層の表面のほうが底面よりもひび割れは発生しやすい。
- 3) アスコンの応力緩和により、アスコンが高温状態の場合に底面より表面のほうが引張応力は大きくなり、トップダウンクラックが発生する状況になり得る。

表-4 荷重時間および残留応力の推定結果

項目	温度 (°C)			
	0	20	40	60
荷重時間 (s)	0.44			
残留応力 (%)	98.4	81.7	16.7	17.0

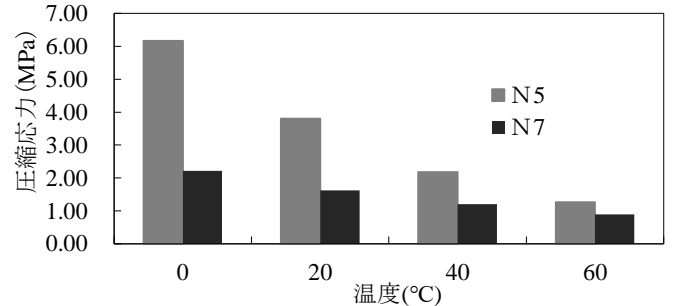


図-8 荷重時のアスコン層表面に発生した圧縮応力

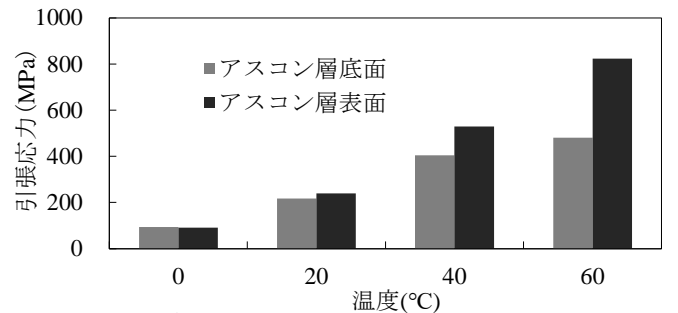


図-9 N5の輪荷重および復元力により発生する引張応力

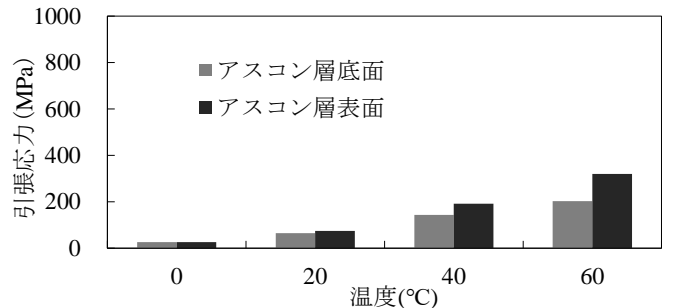


図-10 N7の輪荷重および復元力により発生する引張応力

#### 参考文献

- 1) 平戸ほか：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，土木学会 舗装工学論文集 第21巻，I\_206-I\_209，2016。
- 2) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針，pp192-203，2001
- 3) ザイナル アビディン：アスファルト混合物層の温度評価に関する研究，長岡技術科学大学工学科修士論文，pp.25-42，1992
- 4) 永江ほか：アスファルト混合物層の弾性係数に対する温度補正の一考察，土木学会 舗装工学論文集 第10巻，pp.43，2005。
- 5) 岳本ほか：FWD及び走行車両による舗装体ひずみの計測と解析，土木学会 舗装工学論文集 第9巻，pp.186-189，2004。