

## 1. はじめに

アスファルト舗装に生じるひび割れの形態は、その発生要因と合わせて多様にわたる。車両走行によって下向きの荷重がアスファルトコンクリート（以下アスコン）層に作用した場合、底面で曲げ引張が作用するため、底面から上面に向かってひび割れが進展するボトムアップクラックの発生が一般的である。しかし、実際の路面には、車輪通過位置に沿ってアスコン層表面から底面に向かってひび割れが進展するトップダウンクラックの発生が報告されている。そして、このトップダウンクラックの発生メカニズムについては明らかとなっていない。

トップダウンクラックの発生メカニズムに関する仮定に基づき、これまで様々な要因について検討がされてきた。しかし、発生要因と考えられる舗装温度と劣化程度の影響に関しては明確な知見が得られていない。そこで本研究では、この2つの発生要因がトップダウンクラックの発生に及ぼす影響について、室内試験と数値解析によって検討した。

## 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（以下セメコン）とアスコンの2種類の供試体を用いて、繰返し荷重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、舗装に車輪が荷重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。

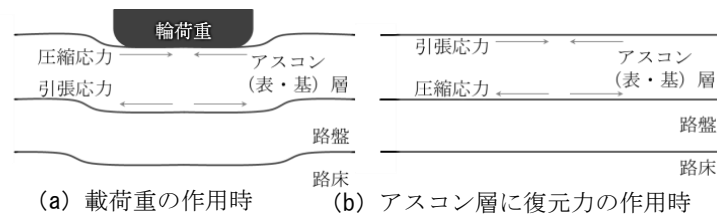


図-1 輪荷重が荷重した場合と除荷した場合の応力

### 3. アスコン層の経年劣化と温度変化が応力緩和性状とひび割れ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 120 °C 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 60/80 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。

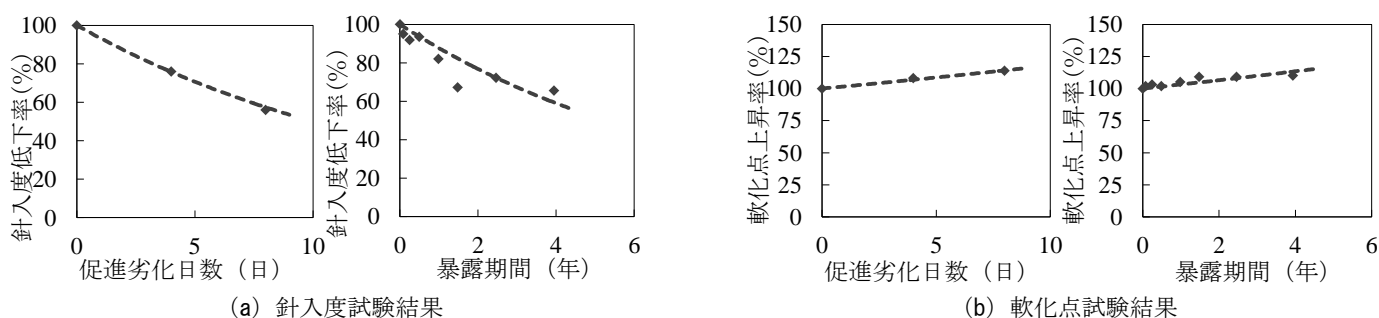


図-2 バインダ試験結果

#### (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、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 (設定ひずみ) 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。

本試験の評価指標は、変形を保持した時点の応力値  $\sigma_{max}$  が応力緩和によってその  $1/e$  に低下するまでの所要時間とした応力緩和時間と定義する。また設定ひずみは、事前の一軸圧縮応力で得た破壊時ひずみの 10 % とした。他の試験条件は表-1 に示す。

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
設定ひずみ	$\epsilon_f \times 10\%$
促進劣化日数 (日)	0 (新規), 4, 8

##### b) 試験結果および考察

促進劣化日数 0 日の条件において、各試験温度での応力緩和時間の結果を図-2 (a) に示す。脆化点よりも高い温度では、応力緩和時間がかかなり小さい値であり、特に常温域の 20~30 °C では応力が急激に緩和する。

試験温度 30 °C の条件において、各促進劣化日数での応力緩和時間の結果を図-2 (b) に示す。応力緩和時間において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。

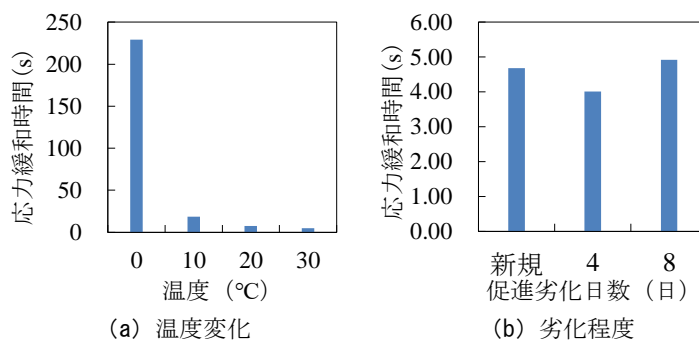


図-2 各条件における応力緩和時間

### (3) アスコンの劣化と温度変化が疲労破壊抵抗性に及ぼす影響

ひび割れの発生・進展段階には、①微細なひび割れが生じる発生段階、②ひび割れが進展し破壊するまでの段階の2段階が存在する。この両方を評価するために、①を静的曲げ試験、②は曲げ疲労試験を実施した。

#### a) 静的曲げ試験の実施要項

アスコン層の劣化がひび割れ抵抗性に及ぼす影響を確認するために、促進劣化期間を異なる供試体を用いた静的曲げ試験を行った。試験方法および結果の整理は、舗装調査・試験法便覧の「B005 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。

表-2 静的曲げ試験の条件

項目	条件
試験温度 (°C)	15
載荷速度 (mm / 分)	50
促進劣化日数 (日)	0 (新規), 4, 8

#### b) 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曲げ疲労試験を行った。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曲げ疲労試験方法」に準拠した。ここでの試験条件を表-3 に示す。

表-3 曲げ疲労試験の条件

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

### c) 結果および検討

静的曲げ試験より、促進劣化に対する破壊時ひずみと曲げ強度を図-3に示す。促進劣化期間が長くなるにつれ、曲げ強度は増加し破壊時ひずみは低下した。一般に、アスコンが劣化しバインダが硬化・脆化すると、ひび割れ抵抗性は低下するといわれている。本試験の結果も同様に劣化が進行するにつれて、ひび割れ抵抗性が低下するという結果が得られた。

曲げ疲労試験より、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-4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。

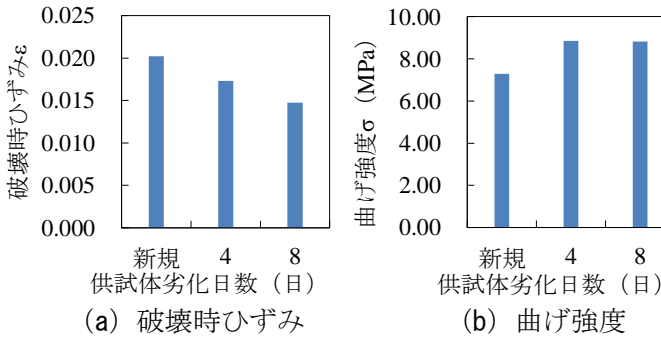


図-3 促進劣化に対する破壊時ひずみと曲げ強度

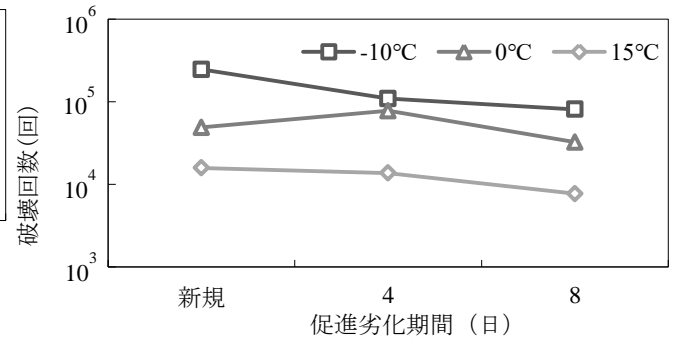


図-4 促進劣化日数と破壊回数の関係

## 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-4 に解析条件を示す．

表-4 解析条件

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

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 1 cm 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-5 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．

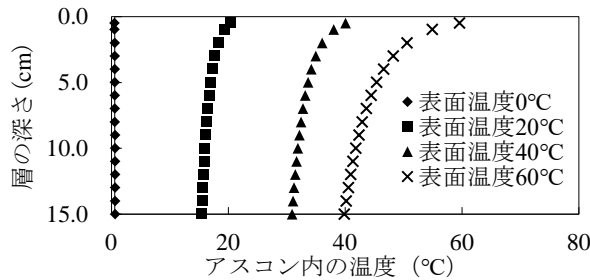


図-5 アスコン層の温度勾配

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

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℃以上になるため，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．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示す．

表-4 荷重時間および残留応力の推定結果

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

#### (4) 解析結果および考察

図-6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の舗装モデルごとに、トップダウンクラックと温度の関係について考察する。

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、また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、さらに表面に大きな引張応力が生じる。ここでアスコン層表面と底面に生じる引張応力、および Miner 則の両方を用いた累積ダメージの算出を行い、図-7に累積ダメージと温度の関係、図-8に舗装表面温度が0℃、60℃の促進劣化期間と累積ダメージの関係を示す。結果として累積ダメージは高温時に舗装表面が底面よりも大きくなった。また、促進劣化期間で比較すると舗装表面温度が0℃では累積ダメージに影響は見られないが、60℃では促進劣化期間が長いほどアスコン層表面の累積ダメージが増加した。これらにより、高温で劣化が進行するほどトップダウンクラックが生じやすいことがわかる。

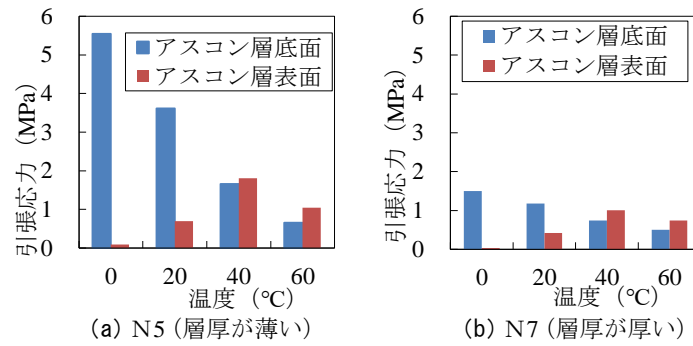


図-6 引張応力と温度の関係

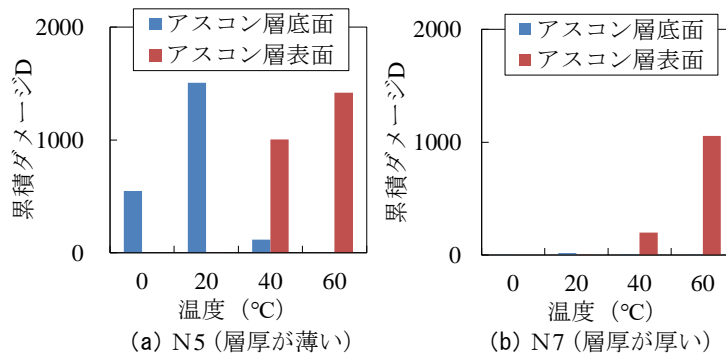


図-7 累積ダメージと温度の関係

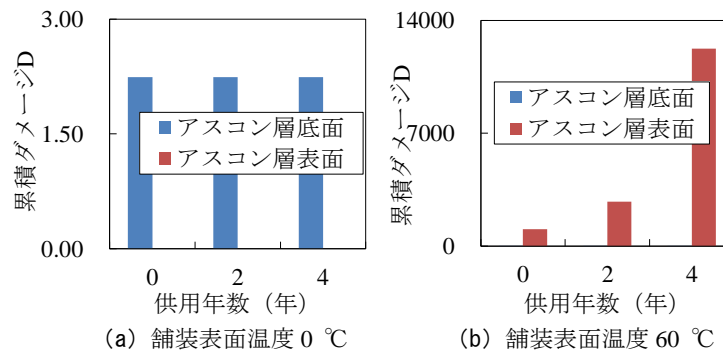


図-8 累積ダメージと促進劣化期間の関係

## 5. まとめ

本研究では、既往の研究で得られたトップダウンクラックの発生メカニズムの仮定に基づき、発生要因の中から経年劣化と温度変化に着目し、これらがアスコン層で発生するトップダウンクラックに及ぼす影響について、室内試験と数値解析によって検討した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

### i) 経年劣化

経年劣化は応力緩和への影響は小さいが、ひび割れ抵抗性に及ぼす影響は大きくなった。これにより、舗装への累積ダメージが増加しやすくなるため、破壊に至る時間が短くなる。またアスファルト舗装は舗装表面から劣化が進行することが既往の研究<sup>6)</sup>でも得られている。これらより、舗装底面より表面の劣化が顕著に表れ、表面における累積ダメージが増加することため、経年劣化はトップダウンクラックに影響を及ぼすことがわかった。

### ii) 温度変化

温度変化は応力緩和とひび割れ抵抗性の両方に影響を及ぼしており、高温域において応力緩和が大きくなり、ひび割れ抵抗性が低くなることがわかった。これにより、経年劣化と同様にひび割れ抵抗性の低下に伴い累積ダメージが増加するだけでなく、高温域での応力緩和によって表面に与えるダメージも大きくなる。よって、温度変化はトップダウンクラックに影響を及ぼし、高温では影響が顕著にみられる。

## 参考文献

- 1) 平戸利明, 姫野賢治, 村山雅人, 高橋将人, 高橋 修: 応力緩和に着目した縦表面ひび割れの発生メカニズムに関する一検討, 舗装 Vol.52, No.6, pp.19-24, 2016.
- 2) 社会法人日本道路協会: 舗装設計施工指針, pp.192-203, 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, 1992.
- 4) 永江 祐, 東 滋夫, 藤波 潔, 松井邦人: 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) 岳本秀人, 久保裕一, 安倍隆二: 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.
- 6) 内田喜太郎, 西澤辰男, 姫野賢治, 野村健一郎: 鋼床板舗装の表面縦ひび割れに関する研究, 土木学会舗装工学論文集 第 10 巻, 1999.