

アスコン層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

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 ○清水 孝史
同 高橋 修

1. はじめに

アスファルト舗装のひび割れには、発生要因や進展形態によっていくつかのタイプに分類されている。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）層表面から底面に向かってひび割れが進展する形態のものである。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が、個々の影響因子が発生メカニズムにどのようにかかわっているのかは明らかにされていない点がある。

既往の研究により、アスコン層表面に引張応力が生じてトップダウンクラックが形成するメカニズムとして、以下の2つの現象が指摘されている¹⁾。

- (1) 輪荷重によってアスコン層表面に生じた圧縮応力が、アスコンの物性である応力緩和によって、除荷直前から減少する。
- (2) 輪荷重除荷後、直ちに路床・路盤の復元力によってアスコン層の変形が復元し、その際にアスコン層表面に引張応力が作用する。

これらの現象の繰返しにより、アスコン層の表面と底面には圧縮応力と引張応力が交互に生じることになり、そのダメージの蓄積、すなわち疲労によってひび割れが発生する。表面から先にひび割れが発生するためには、応力の大小関係に加えて、経年劣化によってアスコン表面にひび割れが発生しやすい状態になっていることが考えられる。そこで本研究では、舗装モデルの解析によってアスコン層の応力緩和がトップダウンクラックへ与える影響を調査し、加えてアスコン層の経年劣化と温度変化が応力緩和に及ぼす影響をアスコンの応力緩和試験によって、疲労破壊抵抗性に及ぼす影響を曲げ疲労試験によってそれぞれ評価した。そして、これらの検討結果を踏まえ、アスコンの経年劣化と温度変化がトップダウンクラックの発生に及ぼす影響について考察した。

2. アスコン層の応力緩和によるトップダウンクラックの発生メカニズム

トップダウンクラックの発生要因として、アスコン層の応力緩和が重要であることが知られているが、どの程度影響するかは不明である。そこでトップダウンクラックが発生するメカニズムとして、上記の2つの現象について定量的な解析を行い、応力緩和がトップダウンクラックの発生に与える影響を評価した。

2.1 解析方法

トップダウンクラックの発生メカニズムを検討するため、輪荷重の載荷時と除荷後におけるアスコン層のひずみと応力の関係を求めた。ここでは数値解析が簡易で、かつ汎用性が高い多層構造解析プログラム GAMES を使用した。すなわち、本解析では舗装体を多層弾性構造でモデル化した。

輪荷重載荷時にアスコン層表面に発生した圧縮応力が瞬時に緩和し、除荷が始まる時点で完全に応力が0になるのではなく、残留応力が生じるものと考えられる。本研究では解析に応力緩和の程度を考慮するため、

表-1 解析に設定した条件

| 項目 | 解析条件 |
|----------------|---------------|
| 交通量区分 | D 交通 |
| アスコン層表面温度 (°C) | 0, 20, 40, 60 |
| 残留応力 (%) | 0, 40, 80 |

残留応力が0%, 40%, 80%になるように解析を行った。また、温度条件の変化については温度ごとにアスコン層の弾性係数を変化させて表現し、アスコン層内温度は層を分割し深さ方向に変化させて実舗装に近づけた。その他の条件については表-1 に示す通りとした。

2.2 トップダウンクラックの発生条件

トップダウンクラックと同じ縦断方向に対して生じるボトムアップクラックと比較するため、本解析では輪荷重載荷時のアスコン層底面、および輪荷重除荷後のアスコン層表面にそれぞれ発生する応力を求めた。輪荷重が載荷している場合、および輪荷重除荷後にアスコン層の変形が復元した場合に層内に発生する応力のイメージを図-1 に示す。ここでは輪荷重によって変形したアスコン層は除荷後において完全に復元するものと仮定しており、ひずみの値で比較することは不適切である。そのため、応力で比較した場合に引張応力が大きいほどひび割れが発生しやすいと仮定した。



図-1 輪荷重載荷時と輪荷重除荷後のアスコン層内に発生する応力のイメージ

2.3 解析結果および考察

応力緩和を考慮した場合にアスファルト層の底面および表面で生じる応力について図-2 に示す。破線の右側が載荷時の底面、左側が除荷後の表面における応力値を示す。応力は引張を正、圧縮を負で表している。除荷後の応力は残留応力が0%の場合、すべての温度で引張応力がかなり大きい。応力緩和の程度が小さい、すなわち残留応力が大きいほど、表面の引張応力は小さく、80%応力が残留する場合は、表面には圧縮応力のみが生じる。載荷時の底面と除荷後の表面に発生する応力を比較すると、残留応力が比較的小さいほど、除荷後のアスコン層の表面で引張が大きい。

残留応力の大きさはアスコンの応力緩和性能で異なるため、トップダウンクラックの発生に影響していることがわかる。また、残留応力が小さいということは応力緩和が大きいことであり、トップダウンクラックはこのような条件で発生するといえる。

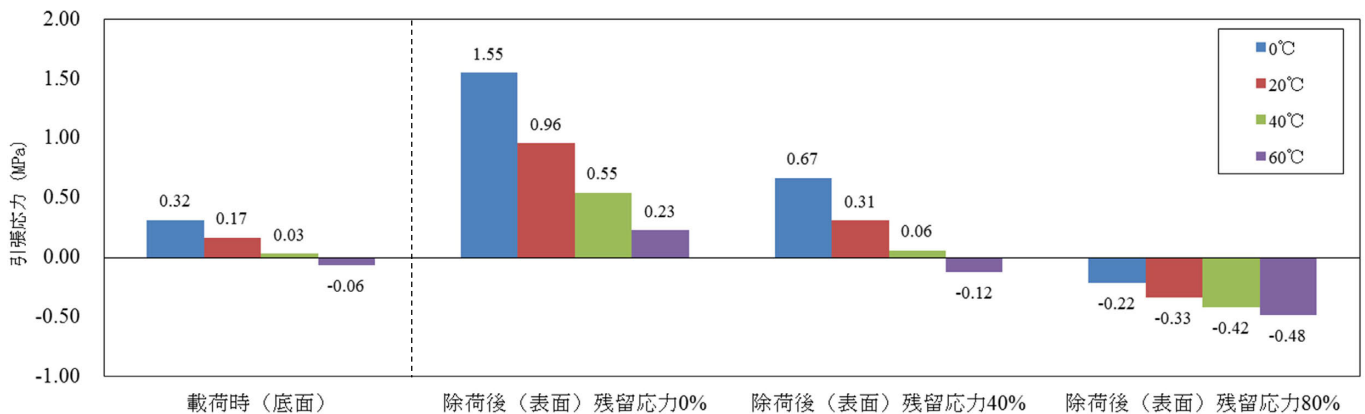


図- 2 応力緩和を考慮した場合に生じる各箇所の応力

3. アスコン層の劣化と温度変化が応力緩和性能と疲労破壊抵抗性に及ぼす影響

3. 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表面からの劣化を再現するため、110℃で保持した空気恒温槽内に作製したホイールトラッキング試験 (WT) 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²⁾。なお、アスコンは密粒度 13 で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-3 にまとめて示す。促進劣化期間が長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。試験結果より、促進劣化期間 4 日は屋外暴露の 2 年、8 日は 4 年にそれぞれ相当することが分かる。

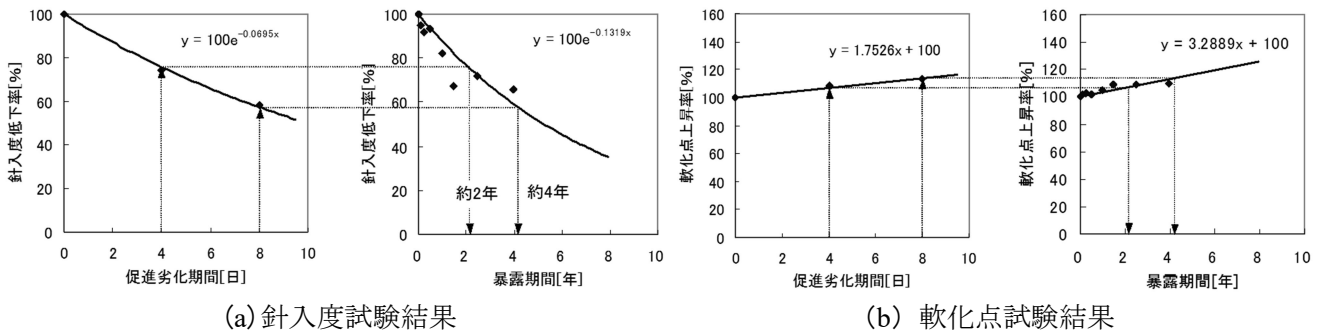


図-3 促進劣化期間と暴露期間のバインダ性状比較

3. 2 アスコンの劣化と温度変化が応力緩和性能に及ぼす影響

3.2.1 応力緩和試験の実施要領

輪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、応力緩和試験を行った。応力緩和試験は破壊しないひずみ変形域で与え、その後ひずみ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、発生応力がひずみを保持した時点の最大応力 σ_{max} から応力緩和によって σ_{max} の $1/\exp(\exp=2.718\cdots)$ まで低下する際の所要時間とし、その値を応力緩和時間 t_g と定義した。応力緩和試験において、アスコンに与える試験ひずみは、事前の一軸圧縮試験で求めた破壊時ひずみの 10% とした。試験条件を表-2 に示す。

表-2 応力緩和試験条件

| 項目 | 試験条件 |
|---------------|---------------|
| 試験温度 (°C) | 0, 10, 20, 30 |
| 載荷速度 (mm/min) | 1.0 |
| 促進劣化期間 (日間) | 0 (新規), 4, 8 |

3.2.2 試験結果および考察

各促進劣化の程度に対して、保持した時のひずみ (試験ひずみ) と応力緩和時間 t_g の結果を表-3 に示す。試験ひずみ、および応力緩和時間のいずれも促進劣化を施しても差異がみられない。そのため、圧縮作用に対しては、応力緩和への経年劣化の影響はかなり小さいものと評価される。

各試験温度に対する試験ひずみと応力緩和時間 t_g の結果を表-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、応力緩和時間も大きく異なり、常温域の 20℃~30℃に応力は急激に緩和する。

表-3 促進劣化日数の違いによる応力緩和試験の結果

| 促進劣化期間 (日間) | 試験ひずみ (μ) | 応力緩和時間 t_g (s) |
|-------------|--------------------|------------------|
| 0 (新規) | 3.04×10^3 | 4.68 |
| 4 | 3.56×10^3 | 4.01 |
| 8 | 3.68×10^3 | 4.92 |

表-4 試験温度の違いによる応力緩和試験の結果

| 試験温度 (°C) | 試験ひずみ (μ) | 応力緩和時間 t_g (s) |
|-----------|--------------------|------------------|
| 0 | 2.19×10^3 | 229.21 |
| 10 | 4.72×10^3 | 18.62 |
| 20 | 4.23×10^3 | 7.47 |
| 30 | 4.19×10^3 | 4.92 |

3. 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

3.2.1 曲げ疲労試験の実施要領

アスコン層の劣化，および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「B018T®アスファルト混合物の曲げ疲労試験方法」³⁾に準拠した．ここでの試験条件を表-5に示す．

表-5 曲げ疲労試験の条件

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

3.2.2 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-4に示す．破壊回数は，試験温度が低いほど少なく，促進劣化期間が長いほど少ない．これは，経年劣化によってアスコンのアスファルト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．

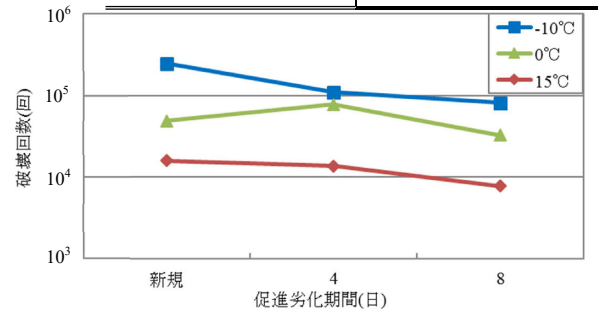


図-4 促進劣化期間と破壊回数の関係

まとめ

本研究では，トップダウンクラックの発生要因であるアスコン層の応力緩和に着目し，その程度がアスコン層の応力状態に及ぼす影響について解析的に評価した．また，アスコンの応力緩和性能と疲労ひび割れに影響する経年劣化と温度変化による効果についても室内試験によって検討した．本研究で得られた知見をいかにまとめる．

- 1) アスコン層の応力緩和性能が高いほどの表面に生じる引張応力が大きく，応力緩和が60%（残留応力が40%）程度で底面よりも表面のほうが引張は大きくなる．
- 2) 経年劣化による応力緩和性能への影響は小さいが，温度の影響は大きい．特に脆化点よりも高い常温域では，温度上昇により応力緩和の程度が高くなる．
- 3) 繰返し作用による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，高温状態ほど疲労抵抗性が低下することから，アスコン層表面のほうがクラックの発生しやすい状況といえる．

劣化の程度と疲労破壊抵抗性の関係について評価を行ったが，0°Cにおける破壊回数と促進劣化日数の関係に-10°C，15°Cと同様の相関関係が見られなかった．そのため，促進劣化期間を追加し，データ数を拡充させ，疲労破壊抵抗性の再評価が必要である．ここではアスコン層表面は経年劣化を生じるが，底面は劣化が少ないと仮定し，経年劣化が応力緩和性状に及ぼす影響を評価してみたが，実舗装に対して同様とはいえない．そこで今後は，解析結果に応力緩和性状の結果を反映できないか検討する必要がある．また，実舗装でアスコン層表面温度は約60°Cに上昇するので，高温状態における応力緩和性状を推測したい．さらに，実舗装に近い条件での解析を行うためにアスコン表面は温度が高く底面は低いことも考慮して，これらがトップダウンクラックの発生に及ぼす影響についても検討していく必要がある．

参考文献

- 1) 平戸 利明: 応力緩和に着目した表面縦ひび割れの発生メカニズムに関する検討，土木学会論文集 E1(舗装工学) vol.72 No.3 , pp. 203-210, 2016
- 2) 芥川 直人: 経年劣化による改質バインダおよび改質アスコンの物理性状変化に関する研究，長岡技術科学大学修士論文，pp21-51, 53-68, 2007.
- 3) 社団法人 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧，pp. [3]166-175, 2007.