

半円形供試体曲げ試験によるアスコンのき裂進展速度評価法に関する研究

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 尾谷 力

1. はじめに

アスファルト舗装における構造上の破壊形態に、ひび割れがある。ひび割れは、アスコン内に生じた微小なき裂の進展によって発生し、徐々に広がり目に見える損傷状況となる。そのため、ひび割れ抵抗性の評価として、き裂が発生するまでの抵抗性や、き裂が発生してから破断するまでの進展過程といったき裂伝播プロセスについて検討することは重要である。

き裂伝播プロセスの評価指標として、き裂進展速度がある。き裂進展速度の評価方法として、曲げ疲労試験¹⁾があり、供試体両側面にクラックゲージを設置することで、き裂進展速度を直接計測することができる。しかし、供試体の準備も含め試験時間に多大な時間を要し、試験装置も大規模となるため、複雑で高価な試験法の一つに位置づけられる。

海外に目を向けると、ひび割れ抵抗性の評価を目的としている半円形供試体曲げ試験（SCB 試験）がある。SCB 試験は、欧州と米国で標準化されておりひび割れ抵抗性を簡便に評価するための試験法で、本来はき裂の進展過程を評価するものではない。さらに、我が国では実績がほとんどなく、知見が乏しいのが実状である。

そこで本研究では、ひび割れ抵抗性能の異なるアスコンに対して曲げ疲労試験を実施し、それらのき裂進展速度を比較した。その後、SCB 試験を行い、その結果と曲げ疲労試験から求めたき裂進展速度の結果を比較し、SCB 試験によってアスコンのき裂進展速度を評価できる評価パラメータを提案することを目的とした。

2. クラックゲージを用いた曲げ疲労試験によるき裂進展速度の評価

2.1 曲げ疲労試験の概要

舗装調査・試験法便覧に規定されている曲げ疲労試験は、ひずみ制御による両振りでの荷重を行う。本研究では、クラックゲージを供試体の両側面に貼り付け、応力制御による片振りでの荷重を行った。応力制御での試験は、荷重回数が多くなるに従って変位が大きくなり、き裂開口部の変形も大きくなるため、クラックゲージでのき裂進展の過程が容易に計測できる。さらに、片振りでの荷重は進展したき裂が閉じることないため、安定してき裂進展を測定することができる。

本研究で使用したクラックゲージは図-1 に示す形状寸法で、疲労き裂が上から下に向かって進展することを想定している。また、本研究での疲労試験は 2 点支持 2 点荷重の条件で実施し、写真-1 に試験実施状況を示す。クラックゲージの測定可能範囲にクラックが生じるように、上端面の中央部に幅 1mm、長さ 7mm の擬似き裂を導入した。供試体は、骨材配列による結果

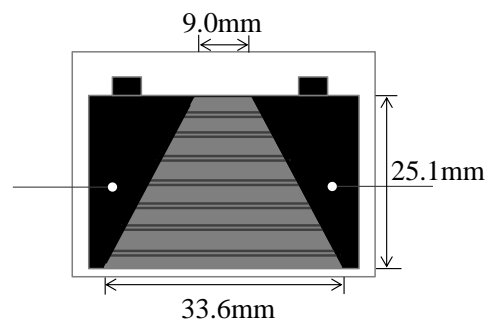


図-1 クラックゲージの概要



写真-1 4点曲げ疲労試験の実施状況

のばらつきを小さくするために、最大骨材粒径を5mmとし、バインダにストレートアスファルト 60/80（ストアス）とポリマー改質アスファルト II 型（改質 II 型）、ポリマー改質アスファルト H 型（改質 H 型）の3種類を使用した。表-1 に試験条件を示す。

2. 2 試験結果および考察

両側面のクラックゲージで測定したき裂長さの平均値をとり各種アスコンのき裂進展速度について評価した。き裂進展の様子を表す結果の一例として、ストアス供試体の試験温度 15°C の場合における載荷回数とき裂長さの関係を図-2 に示す。この曲線の傾きがき裂進展速度を意味しており、傾きをとる範囲はき裂の進展が比較的安定している 5 mm から 20 mm の範囲とした。

各バインダを使用した供試体に対するき裂進展速度の結果を図-3 に示す。これらの結果は、試験温度が低いほどき裂進展速度は遅く、またストアス、改質 H 型、改質 II 型の順序でき裂進展速度が遅くなっている。これは経験的知見に沿った結果となっており、クラックゲージを用いた曲げ疲労試験によってき裂進展速度を評価できていると言える。

3. SCB 試験によるき裂進展速度の評価

3. 1 各規格における SCB 試験の概要

SCB 試験は EN (European Standard) の BS EN 12697-44 や AASHTO の TP124-16 など、海外では一般的な試験法として規定されている。しかし、わが国では標準化に至っておらず、試験条件などが定められていないのが現状である。そこで、EN・AASHTO の試験条件を参考に適当な試験条件を設定することとした。

まず、EN の BS EN 12697-44 では、アスコンの引張強さや破壊靱性の決定として主に用いられている。直径 150 mm、厚さ 50 mm の半円形供試体の下部に擬似き裂を設け、底部中央に引張応力が生じるよう 3 点載荷で曲げ作用を与える試験となっている。BS EN 12697-44 で設ける擬似き裂は、幅 0.35 mm、深さ 10 mm と非常に薄いき裂とっており、特殊なカタを用いる必要がある。試験条件を表-2 に示す。

表-1 曲げ疲労試験の試験条件

項目	試験条件
載荷方法	両端固定片振り2点載荷
スパン (mm)	300
試験方法	応力制御
試験温度 (°C)	10, 15, 20
載荷周波数 (Hz)	10
載荷波形	sin波
荷重振幅(N)	150

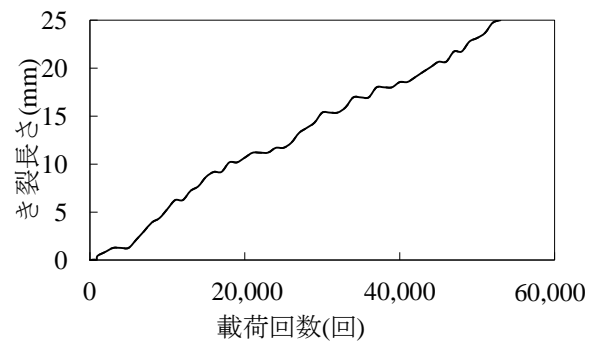


図-2 載荷回数とき裂長さの関係

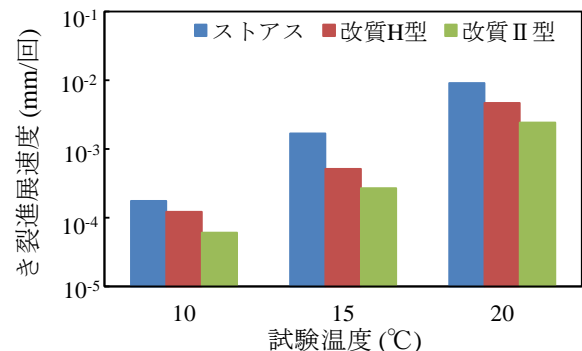


図-3 各供試体の試験温度とき裂進展速度の関係

表-2 EN の SCB 試験条件

項目	試験条件
スパン (mm)	120
試験温度 (°C)	0
載荷速度 (mm/min)	5
疑似き裂寸法 幅×深さ (mm)	0.35×10

次に、AASHTO の TP124-16 では、アスコンの破壊エネルギーの決定や、可撓性の評価に利用される。供試体の形状や曲げ試験である点は、BS EN 12697-44 とほぼ同様であるが、疑似き裂幅が 1.5 mm、疑似き裂深さが 15 mm と供試体に差異がある。また、載荷速度も異なり試験速度は 50 mm/min で行う。試験条件を表-3 に示す。

表-3 AASHTO の SCB 試験条件

項目	試験条件
スパン (mm)	120
試験温度 (°C)	25
載荷速度 (mm/min)	50
疑似き裂寸法 幅×深さ (mm)	1.5×15

3. 2 本研究で用いた SCB 試験の概要

前節では、EN と AASHTO に記載されている SCB 試験の試験法について述べた。海外で使用されている試験法であるため、わが国での設備では困難な部分が見られた。特に、EN では非常に薄い疑似き裂を入れる為に特殊な Cutter が必要となる。そのため、本研究ではこれらの試験法と全く同様の試験法ではなく、現行の試験機や作製器具を用いたより簡便な SCB 試験の試験条件を検討した。

表-4 本研究の SCB 試験条件

項目	試験条件
スパン (mm)	120
載荷速度 (mm/min)	5
供試体寸法 直径×幅 (mm)	150×50
疑似き裂寸法 幅×深さ (mm)	1.5×15

まず、供試体の寸法についてみてみると、厚さは共に 50 mm となっているため問題はない。しかし、疑似き裂の寸法

について着目すると、EN では幅 0.35 mm、深さ 1.0 mm、AASHTO では幅 1.5 mm、深さ 15 mm となっている。EN の寸法では幅が非常に薄いため、特殊な Cutter が必要となるが、AASHTO の寸法であれば現行の Cutter で対応できるため、疑似き裂の寸法は幅 1.5 mm、深さ 15 mm とする。

また、載荷速度についてみてみると、EN では 5 mm/min、AASHTO では 50 mm/min となっている。AASHTO の 50 mm/min は非常に速い載荷となり、本研究における SCB 試験の試験的運用に不適切と考え、比較的試験速度が遅い EN の 5 mm/min を載荷速度とした。試験条件を表-4 にまとめる。

3. 3 試験結果および考察

SCB 試験から得られた荷重-変位曲線の一例を図-4 に示す。AASHTO 基準では破壊エネルギー G_f を評価パラメータとして採用しており、その値をもってひび割れ抵抗性を評価している。破壊エネルギー G_f は以下の式で求められる。

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここに、 G_f : 破壊エネルギー (J/m^2)、 W_f : き裂による仕事 (J)、 A_{lig} : 有効面積 (m^2) である。また、 W_f は次の式で与えられる。

$$W_f = \int P du \quad (2)$$

ここに、 P : 載荷荷重 (N)、 u : 変位 (m) である。

本研究では、き裂進展の挙動に着目しているため、荷重-変位曲線の荷重ピーク以降の範囲で破壊エネルギー (G_{fs}) を求めた。ピーク以降では変位が大きくなるにつれ、載荷荷重が急激に減少していく。

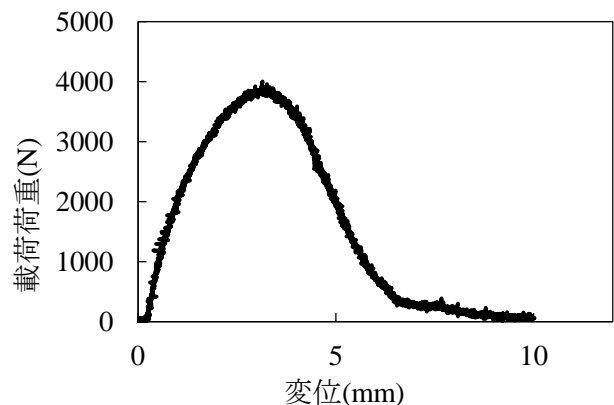


図-4 SCB 試験結果の例

この範囲においてき裂が進行し、供試体の有効断面が減少して、荷重が低下したものと判断される。

各アスコン供試体に対する各破壊エネルギーの値を図-5に示す。各温度における G_{fs} に差があり、ストアス、改質H型、改質II型の順に大きいことがわかる。しかし、バイндаごとの温度変化による G_{fs} の変化が小さく、比較ができない。これより、 G_{fs} のみで条件の異なるアスコンの物性評価は困難であるといえる。

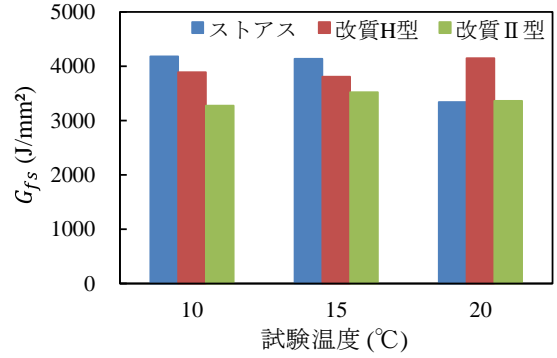


図-5 各供試体の試験温度と G_{fs} の関係

4. 曲げ疲労試験と SCB 試験結果の相関関係

4.1 ピーク後の傾きとき裂進展速度の比較

SCB 試験におけるき裂の進展挙動の差異をとらえる指標として、荷重-変位曲線のピーク値以降の傾き (m_s) について着目した。この傾きと曲げ疲労試験より得たき裂進展速度について比較を行う。

供試体条件ごとに結果をまとめたものを図-6に示す。この結果より、指数関数による近似ではあるが $R=0.95$ と両者の間には高い相関関係があり、 m_s の比較より、き裂進展速度について評価できるといえる。

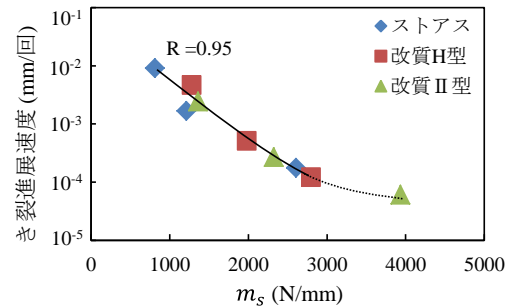


図-6 き裂進展速度と m_s の関係

4.2 ピーク前の傾きとき裂発生回数の比較

SCB 試験から得た荷重-変位曲線のピーク値以前の傾き (m_f) に着目した。 m_f が大きいほど一定変位に必要な荷重が大きいため、 m_f の比較によりき裂発生までの抵抗性について評価できると考えた。

そこで、曲げ疲労試験の結果より、き裂長さが増加し始めた载荷回数をき裂発生回数として、 m_f と比較した。供試体条件ごとに結果をまとめたものを図-7に示す。この結果より、 $R=0.91$ と両者の間には高い相関関係があり、 m_f を比較することで、き裂発生までの抵抗性について評価できるといえる。

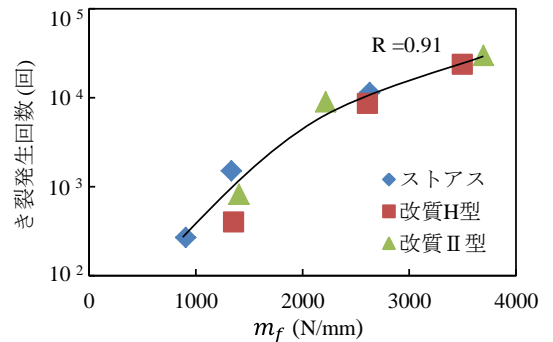


図-7 き裂発生回数と m_f の関係

5. 配合条件の異なるピーク前後の傾きの評価

5.1 検討方法

m_s とき裂進展速度の間には高い相関関係があり、 m_s を比較することで、き裂進展速度について評価できると考えられた。同様に、 m_f とき裂発生回数の間には高い相関関係があり、 m_f を比較することで、き裂発生までの抵抗性について評価できると考えられた。しかし、この結果は最大骨材粒径 5 mm のアスコンを用いたものであるため、実際の舗装で使用されているような、最大骨材粒径 13 mm などの粒径が大きなアスコンに対して評価できるか検討する必要がある。

最大骨材粒径 13 mm での SCB 試験を実施し、 m_{s13} と m_{f13} を求める。この結果を最大骨材粒径 5 mm

の m_{s5} と m_{f5} を比較検討し、相関があることを確認する。両者に相関があることが認められれば、間接的に、最大骨材粒径 13 mm でも m_s と m_f によりアスコンの物性評価ができ、配合条件が変化してもアスコンのひび割れ抵抗性が評価できるといえる。

5.5.2 試験結果

m_{s5} と m_{s13} を比較するため、縦軸に m_{s13} 、横軸に m_{s5} をとり、まとめたものを図-8に示す。また、同様に m_f についてまとめたものを図-9に示す。結果より、両者には非常に高い正の相関があることがわかる。これより、 m_{s13} は m_{s5} と同様に、4点曲げ疲労試験から得られるき裂進展速度と高い相関があることが予想され、アスコンのき裂伝播特性を評価できると考えられる。さらに、 m_{f13} は m_{f5} と同様に、曲げ疲労試験から得られるき裂発生回数と高い相関があることが予想され、アスコンのき裂発生までの抵抗性を評価できると考えられる。

つまり、骨材粒径が変化した場合にも、 m_s と m_f はアスコンのひび割れ抵抗性を評価できると考えられ、ひび割れ抵抗性の評価指標として妥当であるといえる。

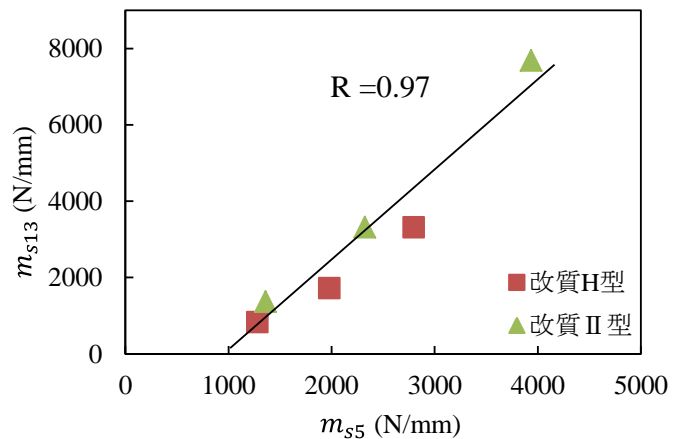


図-8 m_{s13} と m_{s5} の関係

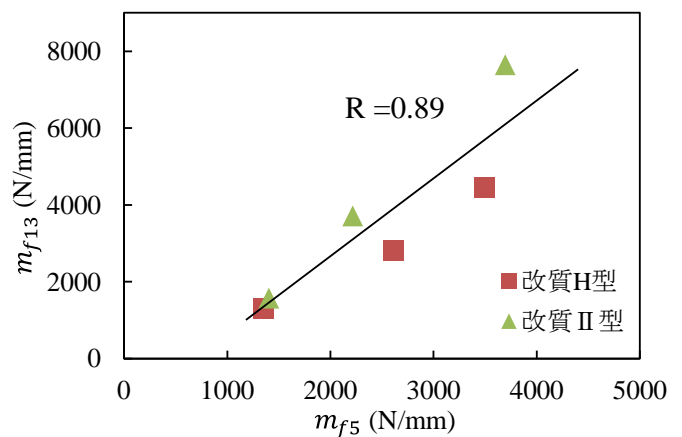


図-9 m_{f13} と m_{f5} の関係

6. まとめ

本研究では、ひび割れ抵抗性の評価値としてき裂進展速度を用い、曲げ疲労試験による実測値に基づいて、簡便なSCB試験の結果から推定・評価することについて検討した。

そこで、SCB試験より得た荷重-変位曲線のピーク値以降の傾きに注目したところ、き裂進展速度との間には高い相関関係が認められた。また、ピーク値以前の傾きに注目し、曲げ疲労試験より実測したき裂発生回数との関係について検討したところ、高い相関があった。

また、骨材配合を変化させた場合であっても高い相関を得られたことから、様々な配合条件におけるアスコンのひび割れ抵抗性を評価できると言えた。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，pp.[3]166-175，2007.
- 2) EN12697-44:2010，Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt -Crack propagation by semi-circular bending test，2010.
- 3) AASHTO TP 124-18 Provisional Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bend Geometry (SCB) at Intermediate Temperature，2018.