

半円形供試体曲げ試験におけるき裂開口角と アスコンのき裂進展の相関性に関する研究

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学課程 交通工学研究室 横井 純

1. はじめに

アスファルト舗装における疲労損傷は、自動車の普及した現代において一般的な損傷のうちの一つとなっている。そのため、アスファルトコンクリート（以下アスコン）の耐久力向上を図る研究が推進されている。また、アスファルト舗装はき裂発生後も、打ち換えが必要だと判断されるまで供用し続けるため、き裂の発生だけでなくき裂の進展にも着目しなければならない。アスコンのき裂進展の速度を測定する際に実施する試験として4点曲げ疲労試験が挙げられるが、この試験は試験機の設定が複雑かつ時間を要するため、非効率だといえる。

そこで、本研究ではき裂進展の速度をより簡易に測定する方法を検討することを目的とした。海外で実施されている半円形供試体曲げ試験（SCB 試験）を行い、脆性破壊および靱性破壊に対応したパラメータを算出した。特に、靱性破壊に対応したパラメータであるき裂開口角（COA）、き裂先端開口変位（CTOD）、き裂先端開口角（CTOA）はアスコンに対する基準が存在しないため、本研究でき裂進展の速度との相関を調べ、利用可能性を評価した。

2. 比較対象となる4点曲げ疲労試験によるき裂進展の速度の決定

4点曲げ疲労試験におけるき裂進展の速度は本研究では式 2-1 のように定義し、計算した値は表 2-1 となった。

$$\text{き裂進展の速度} = \frac{\text{き裂の進展距離 (mm)}}{\text{载荷回数 (回)}} \quad \text{式 2-1}$$

表 2-1 き裂進展の速度

バインダー種	試験温度 [°C]	き裂進展の速度 (mm/回)
StAs	10	1.749×10^{-4}
	15	1.674×10^{-3}
	20	9.094×10^{-3}
H 型	10	1.213×10^{-4}
	15	5.119×10^{-4}
	20	4.673×10^{-3}
II 型	10	6.071×10^{-5}
	15	2.682×10^{-4}
	20	2.428×10^{-3}

3. き裂進展の速度と比較するパラメータ

本研究で比較するパラメータは脆性破壊に対応したものと靱性破壊に対応したものの二種類に分かれる。

3-1 脆性破壊のパラメータの算出方法

破壊強度 K_{ic} の算出方法を式 3-1 に示す。また、 K_{ic} の算出に必要な応力 σ_f の算出方法を式 3-2 に示す。

$$K_{ic} = \sigma_f \times f\left(\frac{a}{h}\right) \quad \text{式 3-1}$$

$$\sigma_f = \frac{P_{ult}}{D \times t} \quad \text{式 3-2}$$

K_{ic} : 破壊強度 (N/mm^{1.5})

σ_f : 応力 (N/mm²)

P_{ult} : 荷重—変位曲線の極大値 (N)

D : 供試体の直径 (mm)

t : 供試体の厚さ (mm)

h : 供試体高さ (mm)

a : ノッチ深さ (mm)

$f\left(\frac{a}{h}\right)$ は幾何学的因子

破壊エネルギー G_f の算出方法を式 3-3 に、荷重—変位曲線のグラフを図 3-1 に示す。

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad \text{式 3-3}$$

G_f : 破壊エネルギー (J/m²)
 W_f : 荷重—変位曲線の領域 (J)
 A_{lig} : 靱帯断面 (mm²)

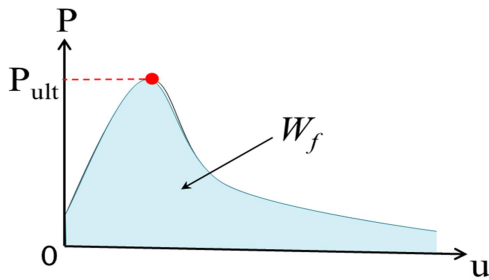


図 3-1 荷重—変位曲線

可とう性指数の算出方法を式 3-4 に、荷重ピーク後の傾きを図 3-2 に示す。

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad \text{式 3-4}$$

FI : 可とう性指数
 m : 荷重ピーク後の傾き
 A : 単位変換およびスケージングに使用される定数 [0.01]

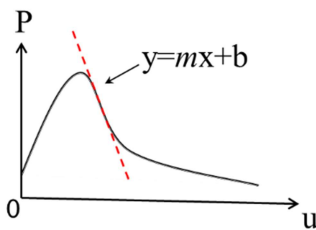


図 3-2 荷重ピーク後の傾き

3-2 靱性破壊のパラメータの算出方法

き裂開口角 COA の算出方法を式 3-5 に示す。

$$COA = 2 \left[\sin^{-1} \left\{ \frac{v}{2[r(R-a)+a]} \right\} \right] \quad \text{式 3-5}$$

COA : き裂開口角 (°)
 R : 供試体高さ (mm)
 a : ノッチ深さ (mm)
 v : き裂開口幅 (mm)
 r : 塑性回転係数

き裂先端開口変位 $CTOD$ の算出方法を式 3-6 に示す。

$$CTOD = 2r(R-a) \sin\left(\frac{COA}{2}\right) \quad \text{式 3-6}$$

$CTOD$: き裂先端開口変位 (mm)

き裂先端開口角 $CTOA$ の算出方法を式 3-7 に示す。また、モーメントおよび P_0 の算出方法を式 3-8、式 3-9 に、 W_f 、 W_{P_0} の領域 等を表したグラフを図 3-3 に示す。

$$CTOA = 2 \tan^{-1} \frac{(W_f - W_{P_0})}{M_0} \quad \text{式 3-7}$$

$$M_0 = \frac{P_0 \times L}{4} \quad \text{式 3-8}$$

$$P_0 = \frac{1}{2} P_{ult} \quad \text{式 3-9}$$

$CTOA$: き裂先端開口角 (°)
 W_{P_0} : P_0 地点までの領域 (J)
 M_0 : P_0 におけるモーメント (N・m)
 P_0 : 荷重—変位曲線の極大値の半分の値 (N)

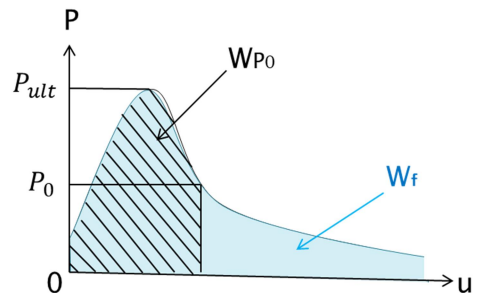


図 3-3 W_f 、 W_{P_0} の領域

靱性破壊のパラメータをまとめた図を図3-4に示す。

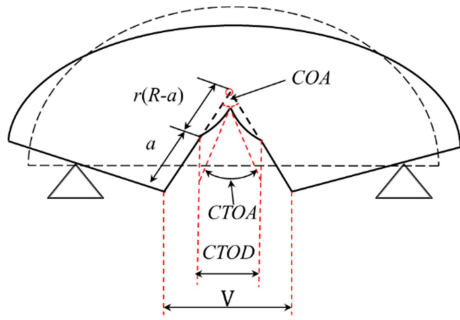


図3-4 靱性破壊のパラメータ

4. 試験の条件

供試体の作製条件および試験条件を表4-1, 4-2に示す。

表4-1 供試体の作製条件

最大骨材粒径 (mm)	5
バインダー種	StAs, H型, II型
締固め方法	SGC (旋回圧縮機)
旋回数 (回)	32
供試体高さ (mm)	75
供試体直径 (mm)	150
ノッチ深さ (mm)	15

表4-2 試験条件

試験温度	10°C, 15°C, 20°C
制御条件	ひずみ制御
载荷速度	5 mm/min
供試体数	4個

5. 実験結果

FI とき裂進展の速度の相関が最も高かった (図5-1)。また, $CTOA$ の式における r_0 の値がそれぞれの実験条件に共通するほど相関が高くなるという性質が確認できた。

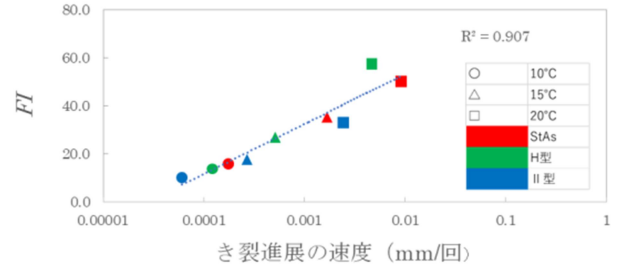


図5-1 FI とき裂進展の速度の相関

6. 考察

FI はき裂の進展に影響する可とう性を評価し, かつエネルギーから値を算出しているためばらつきが少なく, 相関が高くなったと考えられる。

$CTOA$ の式における r_0 の値がそれぞれの実験条件に共通するほど相関が高くなるという性質が確認でき, また, 10°Cにおける r_0 の値が近いものとなっているため (図5-2), 10°Cであれば $CTOA$ とき裂進展の速度に高い相関が確認できると考えられる。

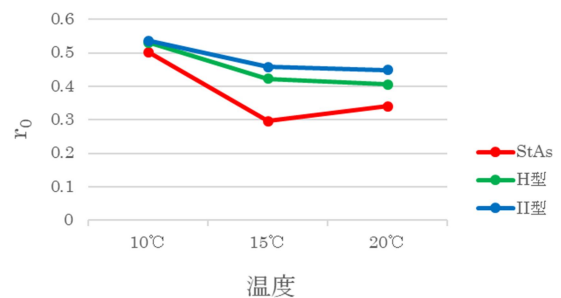


図5-2 バインダー, 温度別の r_0 の値

7. 結論

FI はき裂進展の速度と高い相関がある。実験温度を10°Cにすれば $CTOA$ とき裂進展の速度の相関が高くなる。

参考文献

- BSI Standards Publication. Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt. Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test 2010年9月
- AASHTO. Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using

Semicircular Bend Geometry (SCB) at Intermediate Temperature.

AASHTO Designation: TP 124-16 2017年9月8日

3. I.Haryanto O.takahashi International Journal of Pavement Engineering. Ductile fracture assessment of Indonesian wearing course mixtures using critical J integral and crack tip opening angle, 2008年5月16日
4. AASHTO. FRACTURE ENERGY G_F TP 105-9,105-10 2015年
土木学会論文集 EI. 4点曲げ疲労実験によるアスファルト混合物のき裂伝播特性に関する基礎的研究 2016