

1. まえがき

繰返し荷重を受ける材料の疲労寿命が大きくバラツクことは、古くから知られていることであるが、同一条件、一定応力振巾下にあるアスファルト混合物も、疲労破壊するまでの繰返し数に大きなバラツキのあることが認められる。このバラツキは、変動係数で50~100%にも及び、単に実験誤差や、材料の不均一性に起因するものとみなしがたい。確かに疲労破壊するまでの過程は、クラックの発生から進行、破断に至るまで、本質的に異なっていくつもの機構より成り、また応力集中源となる材料中の欠陥の分布などを考えると、疲労破壊の発生が確率的統計現象であることも容易に推測される。

そこで筆者は、アスファルト混合物の疲労破壊にあつても、寿命のバラツキの現象が、ある条件下において統計的にそれぞれ特長ある説明がなされるものと考え、確率論から検討することを試みた。

今回の報告はその一報として、一定繰返し荷重、一定温度および支持条件下にある組成の異なる2種類の混合物について、その寿命および破壊過程における諸特性の統計的性質を調べた結果である。

2. 実験の概要

2-1. 材料および実験に用いた混合物

実験に用いた骨材は、粗細骨材とも石灰岩で、アスファルトはシェール石油^{60/80}メクスファルトである。混合物の形式は最も一般的な連続粒度の密粒式アスファルト混合物と、不連続粒度をもったいわゆるロールドアスファルト混合物の2種であり、その粒度分布は図-1に示す通りである。両者の混合物のアスファルト量はそれぞれ6.0%および7.0%とした。

2-2. 供試体

供試体の寸法は、高さ4^{cm}、巾4^{cm}、長さ30^{cm}であり、密度が一定となるよう重量管理を行ない、ローラーコンパクターにより作成した。供試体の密度分布は、図-2,3に示す通りであり、これらのうち標準偏差1σ内にあるものを用いた。今回の報告はその中よりさらにランダムに選んだ各40本の供試体の実験結果である。

2-3. 試験機と実験方法

繰返し曲げ試験機は、重スライを持つレバーアームと、無段変速モーターに接続したカム、および載荷部よりなり、荷重の増減は重スライによって行なうものである。供試体支持部は、供試体支持台と供試体中央部をそれと直角方向に支持する弾性板バネより成っている。荷重およびタワミはそれぞれロードセル、LVD Tをピックアップとしてビゾグラフに

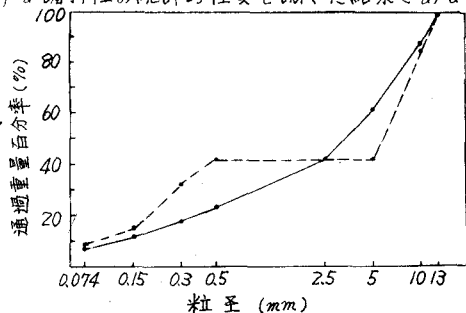


図-1

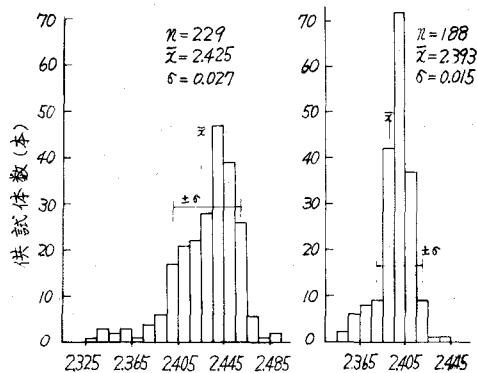


図-2

図-3

よって計測した。今回の実験条件は表-1に一括した通りである。

表-1

繰返し試験中は任意繰返し回数においてタ
ワミ量を測定し、クラック発生に注意した。

載荷周期	載荷時間	載荷重	載荷強度	試験温度	板バネ常数
66 cpm	0.2 sec	96 kg	6 kg/cm ²	10°C	100 kg/mm

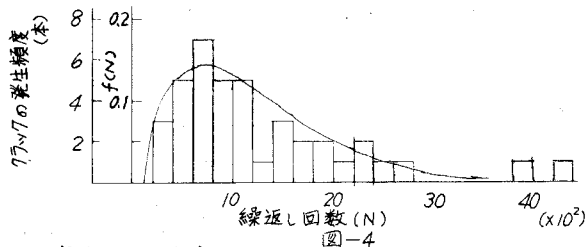


図-4

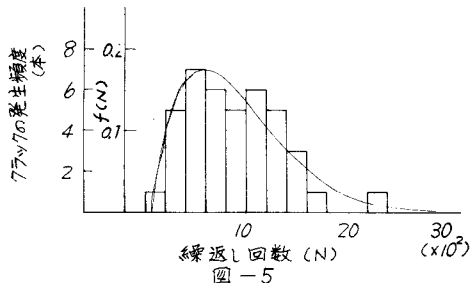


図-5

3. 実験結果と考察

3-1. 疲労寿命の統計的性質

疲労寿命の頻度分布は、図-4、図-5に示した通り大きなバラツキが認められ、かなり複雑な分布であることが認められる。このバラツキの現象はWeibullによって取り扱われた最少数値確率論から導かれる、いわゆるワイブル分布によって説明される。

繰返し数Nまでに破壊する確率F(N)は、

$$F(N) = 1 - \exp \left[- \frac{(N - N_c)^m}{N_0} \right] \quad (1)$$

で表わされる。したがって確率密度関数f(N)は、

$$f(N) = \frac{m(N - N_c)^{m-1}}{N_0} \cdot \exp \left[- \frac{(N - N_c)^m}{N_0} \right] \quad (2)$$

また、繰返し数Nまでに破壊しない確率R(N)は、

$$R(N) = 1 - F(N) = \exp \left[- \frac{(N - N_c)^m}{N_0} \right] \quad (3)$$

となり、任意の繰返し数Nにおいて破壊が毎サイクルあたり発生する確率(瞬間破壊率) $\lambda(N)$ は、

$$\lambda(N) = \frac{f(N)}{R(N)} = \frac{m(N - N_c)^{m-1}}{N_0} \quad (4)$$

である。ここに m: 分布の形状を示すパラメータ

N_c : 分布の位置を示すパラメータ

N_0 : 分布の尺度を示すパラメータ

これらのパラメータを推定し(表-2参照)、2種の混合物についてf(N)を求め図示したのが図-4、5の曲線である。これから疲労寿命のバラツキ現象はワイブル分布によくあてはまることがわかる。次に破壊しない確率R(N)と繰返し数との関係を示したのが図-6である。R(N)は(3)式から求めることもできるが、ここではGumbelおよびWeibullによって独立に与えられた

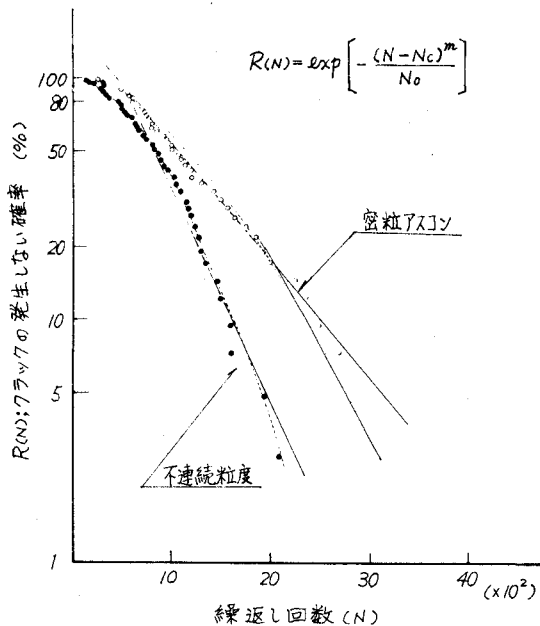


図-6

表-2
各パラメータの推定
(クラック発生時)

	密粒アスコン	不連続アスコン
N_c	120	70
N_0	37.3×10^3	72.6×10^3
m	1.48	1.64

$R = 1 - \frac{\nu}{m+1}$ によって示した。ここに R は総数 n 個の供試体を寿命の小さいものから順に $N_1, N_2, \dots, N_n$ と並べたとき、 ν 番目のものの期待値を表わす。図中の曲線(点線)は(3)式より得られたもので実験結果を忠実に表現していることがわかる。

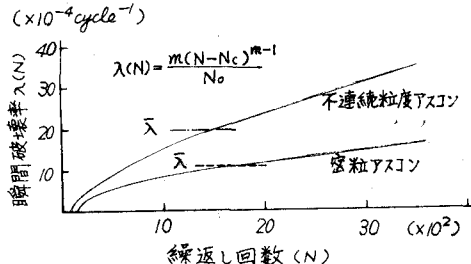


図-7
繰返し回数と瞬間破壊率の関係

瞬間破壊率 $\lambda(N)$ について着目すると、図-7に示すように、繰返し回数との間には混合物によって明確な差が認められる。瞬間破壊率すなわちクラック発生の速度は密粒アスコンが次第に飽和していくのに対し、不連続粒度のアスコンはその速度が大きく、破壊に至る確率の大きくなることを示している。

材料の破壊開始の問題は、一般に確率過程としても説明される。この考え方は平田氏によってガラスの破壊に対し、また横堀氏によって金属の各種破壊および鋼の降伏現象について確かめられ、疲労寿命のパラッキの現象も1954年に確率過程として説明されるに至った。

いまある繰返し数 N_c 以後、破壊の発生は確率過程の問題であるとし、変数 N を連続変数であるとして N_c より測定したとすると、繰返し数 N まで破壊しない確率 $R(N)$ は、

$$R(N) = \int_N^\infty f(N) dN \quad (5)$$

である。ここに $f(N)$ は繰返し数 N の後、 N と $N+1$ サイクルの間で破壊の発生する確率である。一方繰返し数 N まで破壊が発生しないで、次のサイクルではじめて発生する確率は、 $R \cdot \lambda dN$ であり、 $f(N) = -R'(N)$ から、

$$R \cdot \lambda dN = -dR \quad \text{あるいは} \quad \frac{dR}{dN} = -\lambda R \quad (6)$$

である。したがって任意の繰返し数 N において破壊が毎サイクル当り発生する確率(瞬間破壊率) $\lambda(N)$ は、

$$\lambda(N) = \frac{d(\log R)}{dN} \quad (7)$$

の関係が得られる。この式は $\log R$ と N 線図の勾配の符号を変えたものが $\lambda(N)$ を表わすことを示しており、破壊発生の速度が毎サイクル当りの単位で求められることになる。図-6において直線で示したように、実験結果は、ほぼ直線関係にある

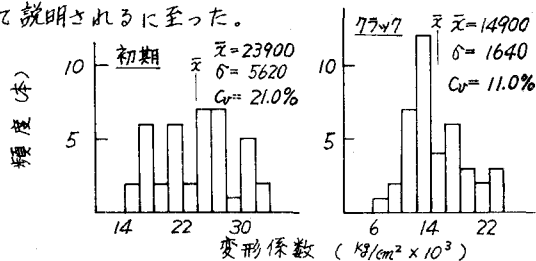


図-8

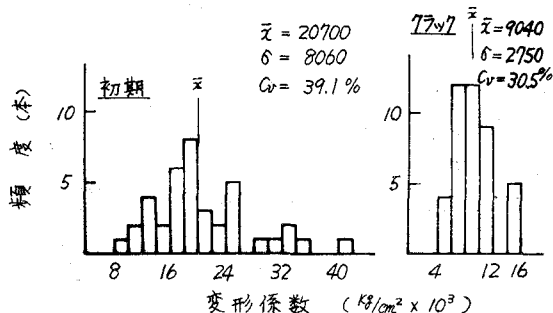


図-9

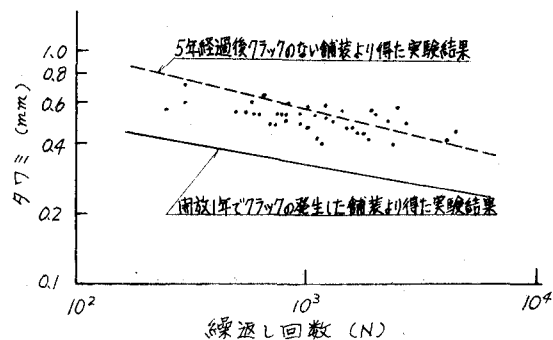


図-10

とみなし、 λ は N に無関係に一定であるとすれば、(6)式により

$$R(N) = \exp(-\lambda N) \quad (8)$$

であり、したがって

$$f(N) = \lambda \exp(-\lambda N) \quad (9)$$

が得られる。この $f(N)$ は(2)式の $f(N)$ に該当しており、(4)式の

表-3 疲労寿命を示す各種特性値の比較

	密粒アスコン		不連続アスコン	
	最小値確率論	確率過程	最小値確率論	確率過程
瞬間破壊率	$3.97 \times 10^5 (N-120)^{-0.4}$	10.73×10^{-4}	$2.26 \times 10^5 (N-70)^{-0.44}$	19.50×10^{-4}
平均寿命	1230	1052	894	583
分散	9.54×10^5	8.69×10^5	2.96×10^5	2.63×10^5

$\lambda(N)$ は $m=1$ のとき、 $\lambda = 1/N$ で表わされ繰返し数 N に関係なく一定となる。図-7に点線で示した λ は、図-6の直線の勾配から求めたものである。表-3は前に述べたワイブル分布から求めた平均値および分散と確率過程から求めたそれと比較したものであるが、 m の値が大きくなるに従って、これらの値の誤差は大きくなり、実験値と約30%の差を生ずるが、疲労寿命の現象は確率過程としても十分に説明することができよう。

また密粒アスコンと、不連続粒度のアスコンの初期状態における変形係数は、それぞれ平均で、 $23,900 \text{ kg/cm}^2$ と $20,700 \text{ kg/cm}^2$ であり、密粒アスコンの方が大きな変形係数を持っているが、この差が $\bar{\epsilon}$ の大きさおよびその漸進的増加の傾向の差になって表われているものと思われる。このような傾向は金属の分野でも認められ、確率過程をもって説明されている。

3-2. 疲労過程における混合物の変形係数

供試体の中央部に中立軸を仮定し、タワミから疲労過程における変形係数を求めた。繰返し載荷初期($N=3$)における変形係数、およびクラック発生時における変形係数と供試体密度との間には明瞭な関係はみられなかった。しかしクラック発生時の変形係数と、その時までの繰返し回数の間には変形係数の大なるものほど、繰返し回数の大きい傾向が見受けられる。この傾向はDeaconによっても指摘されている。ここで興味深いことは、初期におけるタワミと、クラック発生時あるいは破断直前でのタワミのバラツキにある。このことは当然変形係数についてもいえることであり、図-8、図-9に示すように、それらはほぼ正規分布をなし、かつ初期において大きくバラツキている変形係数もクラック発生時ではそのバラツキが小さくなる。今回の実験ではクラックの発生するタワミ量は、密粒アスコンで $0.46 \sim 0.60 \text{ mm}$ 、不連続粒度のアスコンで、 $0.60 \sim 0.72 \text{ mm}$ であった。これらの値は混合物の組成はもとより、温度条件、載荷間期などによって大きく異なろうことは容易に推測できるが、図-10に示すようにHveem等の行った実験結果とかなり似かよった傾向が見受けられる。図中の点は今回の実験結果であるが、これらのタワミ量と実際の道路での限界タワミ量とも直接比較することはできない。

4. あとがき

以上述べたように混合物の繰返し応力による疲労寿命は、変形係数の低下あるいは、タワミ量の増加の割合によっても説明されるが、その過程での機構、たとえばヒズミエネルギー蓄積の機構、および前に述べた瞬間破壊率 λ の材料学的な意義とそれらの結びつけがこれからの問題点であろう。

本研究は現在なお応力条件および温度条件をかえて続行中であるので、次の機会に追って発表した。