

アスファルト舗装のクラック

阿部 頼 政*

1. はじめに

編集委員会からの依頼により、本号から「研究ノート」の連載を担当することになった。一回ごとの完結で解説的に書くようにという注文である。有意義な企画なので筆者も出来るだけ努力するつもりでいるが、将来は、数人の執筆者グループを作り、それぞれが得意な分野を解説する方法なども検討して見たいと思う。当面の方針としては、重要なテーマをいくつか選び、それぞれについて現段階で得られる知識を集約していく予定である。

本号では、アスファルト舗装のクラックの問題をとりあげた。最初に舗装のモデルを概説し、次に単純梁の断面力を求めて引張応力の発生することを確認してから、

材料的な問題を検討することにする。

2. 舗装の力学的モデル

アスファルト舗装は一般に、表層・基層・上層路盤・下層路盤からできている。この構造を、簡単なモデルに置きかえ、力学的に取り扱おうとする試みが古くから行なわれてきた。広く知られているものの中から代表的なモデルをあげると、次のようになる。

- ①半無限弾性体として考える方法 (図1)
- ②地盤反力を考慮した舗装版 (図2, 3)
- ③半無限弾性体上の薄板 (図4)
- ④多層弾性体 (図5)

①はイギリスで舗装厚設計に試みられた方法で、一様地盤中の応力のうち特にせん断力に注目していることからせん断力法として知られている。これは、舗装と路床を一樣な弾性体として考え、路床土に生ずる最大せん断力の分布をもとにして、路床土の許容値を超えないように舗装厚を設計する方法であるが、現在のように、cmのオーダーできめの細かい設計を求められては、もう実用的でないと言っても過言ではなからう。

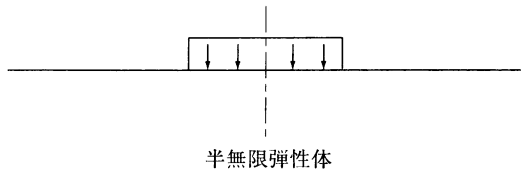


図1 半無限弾性体

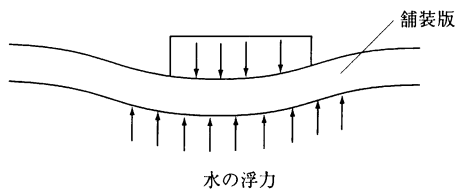


図2 水の上の舗装版

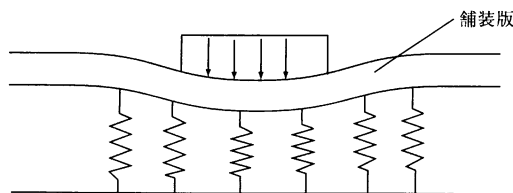


図3 スプリング上の舗装版

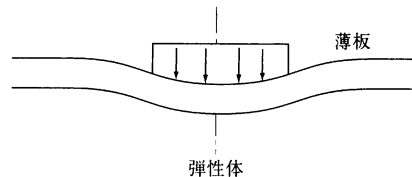


図4 弾性体上の薄板

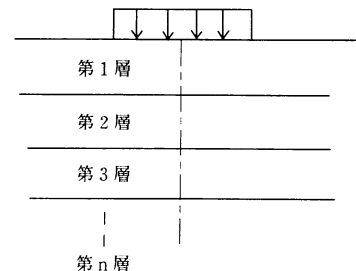


図5 多層弾性体

* 日本大学理工学部土木工学科 講師

②は、地盤反力を、液体の浮力や（図2）、スプリング（図3）で表現した方法であり、特に後者はコンクリート舗装に広く利用されてきた。このモデルの特徴は舗装版より下の層を単に反力を与えるもの見なして、版自体の応力のみを議論することにある。アスファルト舗装におけるアスファルト混合物層は、荷重を分散して下方に伝えることが主な役割であり、版としての効果は期待しないというのが一般的な考え方であったから、この版理論はほとんど利用されなかった。

③は、②のモデルをさらに一歩進めたものであり、たわみの計算に便利であるが、アスファルト舗装では一部の研究者に利用されている程度である。

多層構造理論は、Burmisterが二層構造における表面変位の図表を発表して以来、広く注目されるようになり、三層構造におけるJonesの数表等を経て、現在では、電子計算機用のプログラムもいくつか開発され、理論的な舗装設計法として実用化されつつある。

以上の例からある程度推察できるが、舗装のモデルは①のように路床の応力を対象とするもの、②、③のように舗装体の応力を対象とするもの。さらに④のように両者を考慮するものと分けられる。これは、設計の根拠として、路床の破壊や永久変形に重点を置くか、又は舗装体（特にアスファルト混合物層）の破壊に重点を置くかの問題に対応している。いずれを重要視すべきかは、簡単に決められることなく、実際の舗装では両者が相互に影響しあって究極的な破壊に到達すると考えられる。

本号でとりあげようとしている問題は、アスファルト混合物層（表層・基層あるいはアスファルト安定処理層を含む）に生ずるクラックであるから、②、③あるいは④のモデルで考えればよいのであるが、これらはいずれも数式が複雑であり、かえって本質を見失うおそれがあるので、図6に示すような単純梁に生ずる応力からクラックの発生を考察することにする。舗装に生ずる応力を定性的に理解するにはこれで充分である上、アスファルト材料の有力な研究手段である曲げ試験の原理をも考察できるからである。

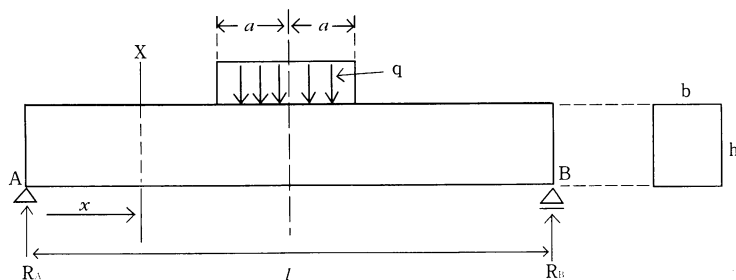


図6 単純梁

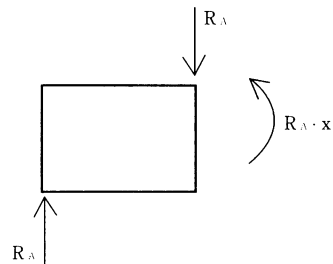


図7 左側の梁のつりあい

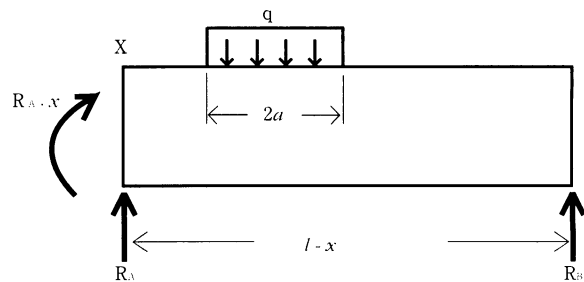


図8 右側の梁のつりあい

3. 梁の断面に生ずる応力

図6に示すように、長さ l の単純梁の中央において単位長さあたり q の等分布荷重がかかっているものとする。支点反力を R_A 、 R_B 、とすれば、左右対象であるから、荷重は両支点到均等に配分される。したがって

$$R_A = R_B = q a \cdots \cdots (1)$$

いま、AC間の任意の点Xで梁を切断して考えると、Xの左側に働いている力は R_A のみである。この R_A とつりあうために、切断される前は右側の梁から左側の梁に何かを与えていたわけであるが、その「何か」を考えて見よう。まず単純に考えれば、 R_A と向きが反対で大きさの等しいものを与えればよさそうに思えるが、図7で直感的にも明らかなように、2つの R_A なる力が偶力を構成し、左側の梁全体が時計まわりにぐるりと回転してしまう。つまり、この回転をとるための $R_A \cdot x$ なるモーメントも加えてやっってはじめて左側の梁はつりあいを保つわけである。言いかえれば、切断面Xでは、梁の右側から左側に対して、 R_A なる力と $R_A \cdot x$ のモーメントを与えているのである。

次にXの右側を考える。切断される前に左側から右側に及ぼしていたものは、これまでの考察から、反作用としての R_A （上向き）と $R_A \cdot x$ （時計まわり）と予想されるが、これで右側の梁全体がつりあっていることを証明しよう。それには、鉛直方向の力の和と任意の点のまわりのモーメントの和がゼロになることを示せば充分である。図8において、

$$\text{鉛直方向の力の和} = R_A - 2qa + R_B = qa - 2qa + qa = 0 \dots\dots(1)$$

$$\text{X点のまわりのモーメントの和} = R_A \cdot x + 2qa \left(\frac{\ell}{2} - x\right) - R_B (\ell - x)$$

$$= qax + qa\ell - 2qax - qa\ell + qax = 0 \dots\dots(2)$$

(1), (2)より, 右側の梁はつりあっており, 予想が正しかったことを示している。

以上の考察をまとめると, 断面Xにおける微小巾 dx の部材では, 図9のような力とモーメントを受けていると言える。これをさらに分解すれば, 図10 (a), (b)のようにモーメントと力の作用に分けられるが (a) は部材を (a') のように曲げる働きをするので曲げモーメントと呼ばれ, (b) の R_A は部材を (b') のようにずらす働きをするのでせん断力と呼ばれている。このように, 梁の断面では, 曲げモーメントとせん断力が働いているが, 舗装のクラックを問題にするのに重要なのは曲げモーメントの作用であるため, ここでは曲げモーメントだけについて考察していこう。

AC間の梁において, 曲げモーメントの大きさ M_{AC} はCの左側にある荷重の作用を考えて

$$M_{AC} = R_A x = qax \dots\dots(3)$$

同様にしてCD間では

$$M_{CD} = R_A \cdot x - q \left(x + a - \frac{\ell}{2}\right) \frac{(x + a - \frac{\ell}{2})}{2}$$

$$= -\frac{q}{2} \left\{x^2 - \ell x + \left(a - \frac{\ell}{2}\right)^2\right\} \dots\dots(4)$$

左右対象であるから曲げモーメント図は, 図11のようになり, 中央で最大曲げモーメント $\frac{1}{2}qa(\ell - a)$ を得る。このように梁の断面にはその位置によって異なった曲げモーメントが働らくが, この曲げモーメントによってどのような応力が発生するかを次に考えてみよう。

図12は, 曲げモーメントの作用により, 梁が曲がった状態を示したものである。図の ab 部分は $a'b'$ に圧縮され cd 部分は $c'd'$ に伸ばされている。この伸びと縮みはそれぞれ両端で最大になるが, 連続的に変化しているはずであるから, 途中で伸びも縮みもしないところがあることは容易に推定できよう。これが中立軸 ($n-n$) と呼ばれるものである。すなわち, $a'-b'$ で縮みは最大の状態から中立軸に近づくにつれて徐々に小さくなり, 中立軸でゼロとなる。さらに中立軸を超えて $c'-d'$ 側に入ると今度は伸びが始まり, 端の $c'-d'$ で最大の伸びを示すわけである。この縮みと伸びによってそれぞれ発生する圧縮応力と引張応力の分布を, 圧縮弾性係数と引張弾性係数が等しい場合について図13に示した。中立軸からの任意のきよりを y とすれば, その位置に生ずる応力と曲げモーメントの間には次の関係が成立する。

$$\sigma = \frac{M}{I} y \dots\dots(5)$$

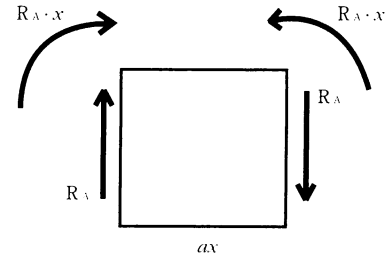


図9 梁の断面に生ずる力とモーメント

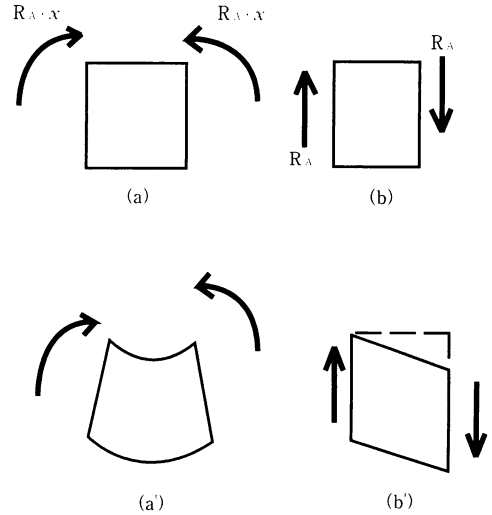


図10 モーメントと力の作用

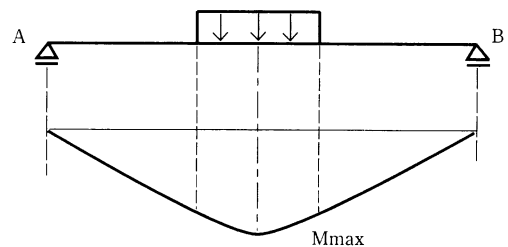


図11 曲げモーメント図

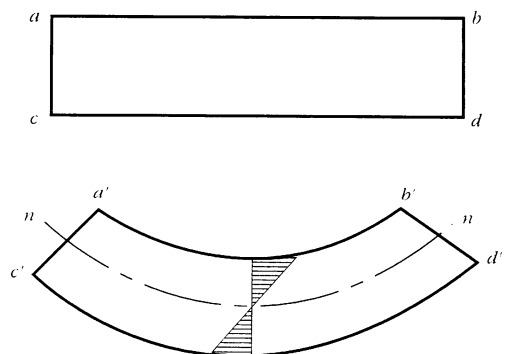


図12 梁の曲げと中立軸

ここにIは断面二次モーメントでこの梁の場合、 $\frac{bh^3}{12}$ で与えられる。

図13からも明らかなように引張応力は下縁で最大値を示す。また、引張歪も下縁で最大になる。

アスファルト舗装のクラックは、この下縁に生ずる引張応力あるいは引張歪が原因である。下縁に生じたクラックが上方に伝播して、舗装表面に現られるクラックとなるのである。

4. アスファルト舗装のクラック

前章までに簡単なモデルを使って、アスファルト混合物層に発生する応力を考察してきたが、層の上部で圧縮を受け下部で引張を受けるということは、舗装体の実測でも明らかにされている。¹⁾ この圧縮と引張は、舗装の破壊の典型的な2つのタイプ、すなわち、わだちぼれとクラックに直接結びつくものである。この場合、圧縮の影響が通常の破壊形態をとらず混合物の流動という形をとっているのは、アスファルト混合物の特殊性であるが、引張によるクラックの発生、進展というプロセスは、金属材料やセメントコンクリートの破壊ときわめて類似している。従来、アスファルト混合物の破壊に関する研究は、引張を中心に行なわれてきたが、引張強度が圧縮強度に比べて極端に小さいことを考えれば当然と言えよう。セメントコンクリートの引張強度は圧縮強度のほぼ10分の1と言われている²⁾が、温度や載荷速度による影響はあるにせよ、アスファルト混合物もほぼ同様の傾向があると考えてよい。図14に両者の関係の一例³⁾を示す。引張強度は圧縮強度の約8分の1になっている。

アスファルト舗装においてクラックが発生する原因は破壊の形態から次の2種類に分類できる。

- ①引張強度または限界の歪を超える単一荷重による破壊
- ②輪荷重の繰り返しによる疲労

以上の原因のうち①はアスファルト混合物層の比較的薄い舗装に生じやすい。施工後2、3年以内に発生するクラックは、主としてこれが原因と考えられる。数年を経た舗装においては、一般に疲労が原因と見なされがちであるが、実際には引張強度の低下にともなうこの種の破壊がかなりの部分を占めている可能性がある。特に加速・減速の激しい交差点のようなところでは、この傾向が強いと思われる。過度の歪による破壊はアスファルト混合物の特殊性がうかがえる。弾性体では応力と歪は表裏一体の関係にあるが、アスファルト混合物は、塑性変形をするため、応力は小さくとも歪はかなり大きくなる場合がある。例えば、小さな輪荷重でもこれが静止していれば、特に高温時で下層の支持力が小さい場合など、容易に破壊歪を超えてしまう可能性があるわけである。

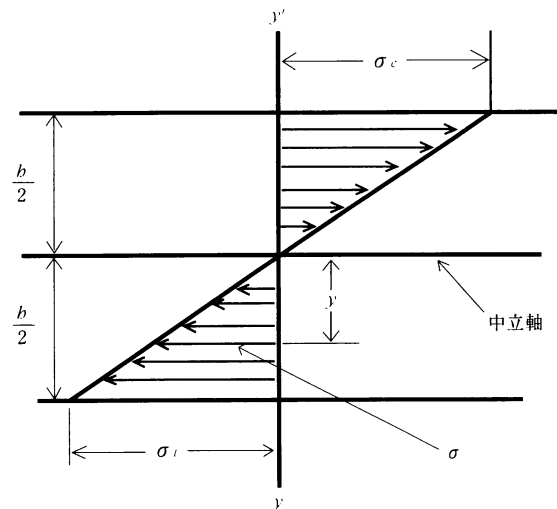


図13 曲げにより生ずる引張と圧縮

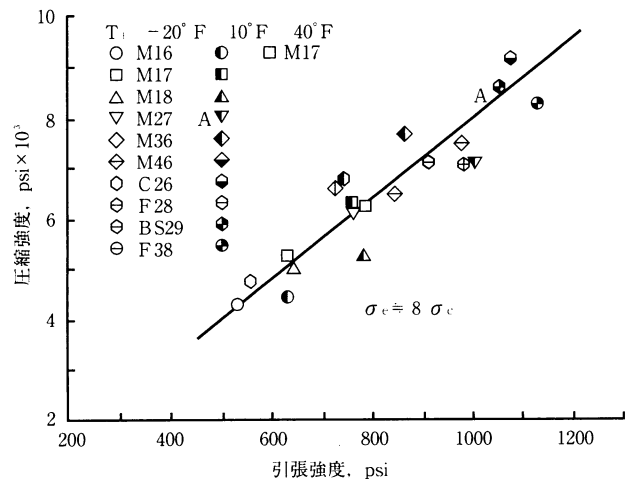


図14 引張強度と圧縮強度の関係 (Monismith)

②の形態は、アスファルト混合物に限らず、繰り返し荷重のかかる材料一般に共通する現象で、このような形態による舗装の破壊は逆に理想的とも言える。すなわち材料を耐久限度まで利用できたことになるからである。

次章以下で ①の検討としてアスファルト及びアスファルト混合物の引張強度を種々の文献から整理し、②の形態については、疲労試験の成果として一般に認められている部分を定性的に紹介する。

5. アスファルト単体の引張強度

混合物の引張強度を左右するものは、いうまでもなくアスファルトである。したがって、アスファルト単体の引張強度については多くの研究者によって実験が行なわれてきた。その代表的な方法は、図15のように円筒の間に試料をはさみ、一定の速度で引張るものであるが、強

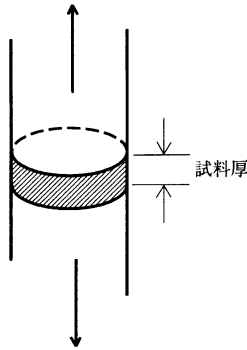


図15 アスファルトの引張試験

度に影響を与える大きな要因として次の項目があげられる。

- ①試料の厚さ（膜厚）
- ②温度
- ③载荷速度

一般的な傾向としては、膜厚が薄い程、温度が低い程さらに载荷速度が速い程、引張強度は大きくなる。図16は、Marek⁴⁾が、WLFの式を変形して求めたシフトファクターを使い①②の実験結果をまとめたものである。膜厚10 μ 程度で引張強度は1000psi（約70kg/cm²）に達している。実際の混合物で骨材を被覆する膜厚は6～8 μ 程度であるから、これよりさらに高い値が得られる可能性がある。しかし、この実験データは、他の研究者に比べてかなり大きく出た例であり、一般的には、Van der Poelや、Ericksonその他の研究者が一致して示している30kg/cm²前後の値が平均的なもの（低温、高速で）とされている。⁵⁾このような実験は、試料の作製法、試験法等にも影響されるので定量的な考察はなかなかむずかしいと言えよう。また、多くの研究者によって実験されてきたにもかかわらず、アスファルト単体の強度は二次的な問題であり、混合物の強度特性を説明する根拠としてのみ価値があると考えられる。なお、アスファルトの種類や針入度については、温度、载荷速度が複雑に影響しあうので、引張強度と明確な関係を見出し難いようである。

6. アスファルト混合物の引張強度

これまで引張強度という言葉を使い続けてきたが、これは実験から直接求まる値でないことは言うまでもない。普通、引張強度は、その供試体の示す最大応力として使用されているが、応力は測定されるものでなく与えた力を断面積で割って求めている。この場合、応力は供試体中に一様に分布するという仮定が入り、また、供試体が伸びたことによる断面積の減少も考慮されないことが多い。歪も同様に、供試体の伸びを供試体の寸法で割って求めている。したがって実験も、供試体の一部

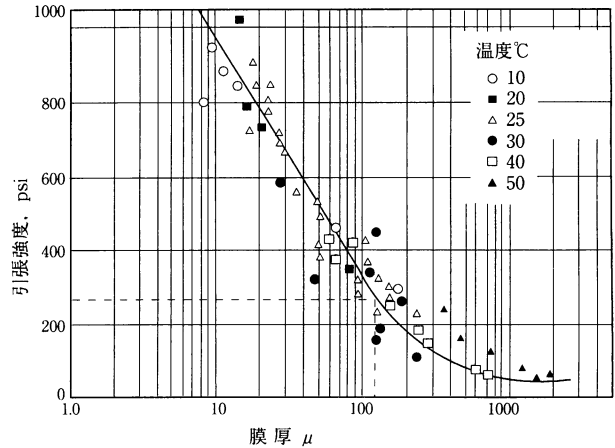


図16 引張強度と膜厚の関係

に応力集中が生じない方法をとる必要がある。アスファルト混合物の場合、圧縮試験は比較的簡単であるが、引張試験では、供試体を試験機に取り付ける方法が難しく、曲げ試験の結果から計算で求める方法も多くとられてきた。すなわち、3章で説明した方法により、供試体を弾性体と仮定して、曲げモーメントの大きさから引張応力を求める方法である。特にこの方法は、次章で述べる繰り返し試験に多く利用されてきた。この場合、歪は、(引張応力/弾性係数)として定められている。しかし、近年、エポキシ樹脂等、接着剤の発達によって取り付け部分の問題もある程度解決され、直接の引張試験が容易になってきた。

アスファルト混合物の引張強度に影響する要因はきわめて多い。したがって、いかなる条件のもとでの引張強度かということが、常に重要な問題となる。要因の主なものを列挙すると

- ①試験温度
- ②载荷速度
- ③アスファルトの硬さと量
- ④骨材の粒度と質
- ⑤フィラー量
- ⑥混合物のスティッフネスと空隙率

以上の要因が複雑に影響しあうため、完全に整理することはきわめて難しいが、比較的まとまった実験を行っているEppsとMonismithらの研究に注目しながら、以上の要因を考察していくことにする。

(1)引張強度と破壊歪の関係

図17はMonismithら⁶⁾が、アスファルト混合物引張強度と破壊時の歪の関係を示したものである。縦軸のとり方が特異であるが、これは高分子材料の分野で使用されている方法で、Tは絶対温度を表わしている。点線は破壊包絡線と呼ばれるもので、温度がさがる（材料の強度

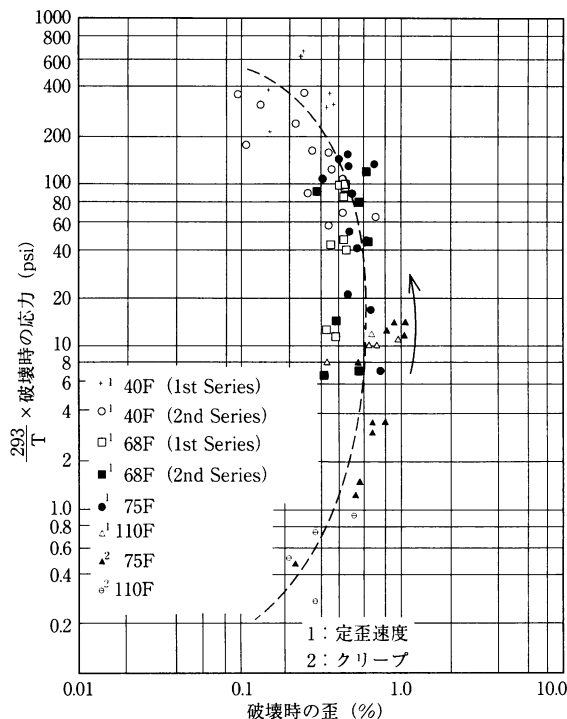


図17 破壊時の応力・歪・温度の関係 (Monismith)

があがる)につれて測定値の上方に移動していく様子が容易に読みとれる。実験方法や材料の詳細は省略するとして、この図から読みとれることは、まず温度が40°F~110°F (4.5°~43°C)の範囲で、引張強度は0.1kg/cm²~40 kg/cm²ときわめて大きく変化することである。特にクリープ試験からは小さい値が得られている。歪は、ほぼ10⁻³~10⁻²の範囲に分布しており、常温以下では、温度がさがればさがる程、破壊時の歪は小さくなる傾向がある。すなわち、低温では引張強度はあがっても、許容できる歪が小さくなる。これは、舗装体が何かの原因で(たとえばアスファルト混合物層の下の支持力が弱かったり、空洞ができていような場合)大きく変形すると、瞬間的に破壊するおそれがあることを示している。

(2) 温度と荷速度の影響

アスファルト混合物の一般的な性質から、温度が低く荷速度が速い程、引張強度は大きくなると想像されるが、この種の実験の一例⁷⁾を図18に示す。0°C以下では荷速度にあまり影響されず、ほぼ80kg/cm²の一定値を示す傾向にある。これは、アスファルト混合物が低温においては弾性的な挙動をすることから当然の結果のように思われるが、実際には、ある程度以下になると、混合物がもろくなり、引張強度は小さくなる傾向を示す実験結果が多い。その限界の温度は、荷速度や混合物の種類によって異なるがほぼ-10°C~10°Cの範囲にある。

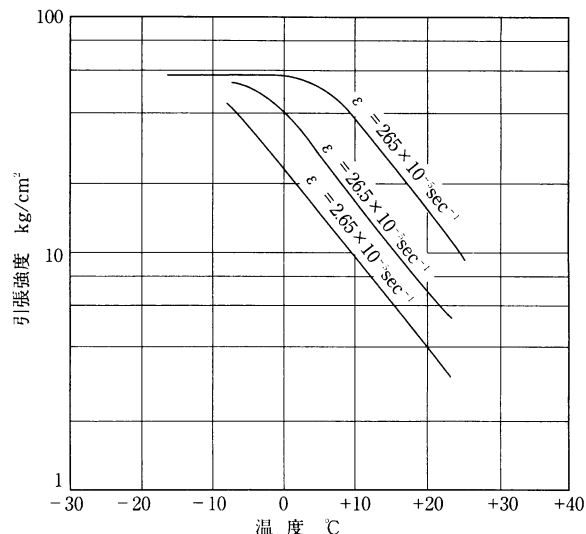


図18 引張強度、温度、荷速度の関係 (Van del poel)

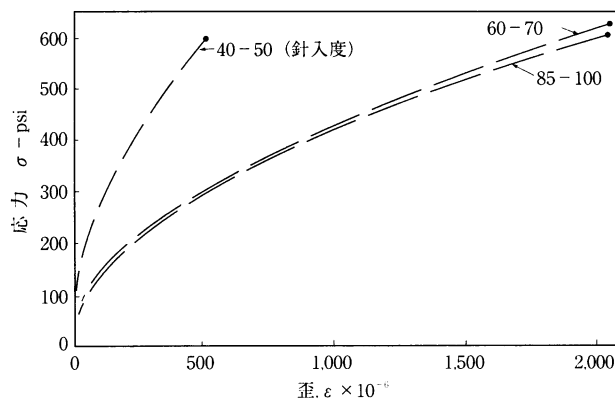


図19 アスファルトの針入度が応力-歪曲線に与える影響 (Epps)

言い換えれば、アスファルト混合物は、この温度範囲で最大の引張強度を示すわけである。

(3) アスファルトの影響

図19はアスファルトの種類を変えた実験の一例⁸⁾で粒度はカリフォルニア規格の中間粒度 (Medium Grade)、アスファルト量6.0%を使用している。データの数が少ないので、結論めいたことは言えないが、引張強度にあまり差がないにもかかわらず、硬いアスファルトで破壊歪の小さい点が目立っている。すなわち、混合物のステイフネスの大きいものは破壊歪が小さいという結果になっている。この例で見ると、針入度は必ずしも良いパラメーターと言えないが、一般に針入度の小さいアスファルトを使用した混合物ほど、ステイフネスは大きく、破壊歪は小さいようである。

図20, 21は、やはりEppsら⁸⁾が種類の異った混合物についてステイフネスと引張強度、破壊歪の関係を調べたものである。図によれば、ステイフネスと引張強度

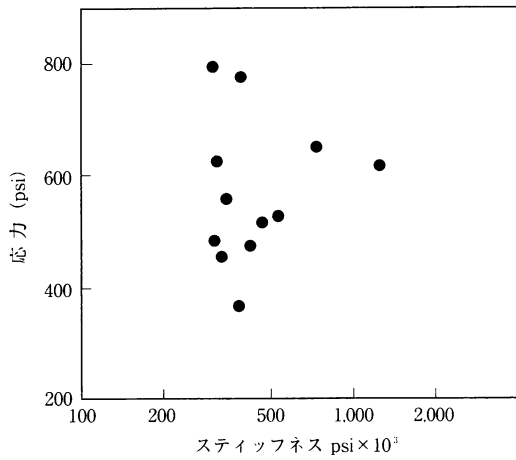


図20 破壊時の応力とステイフネスの関係 (Epps)

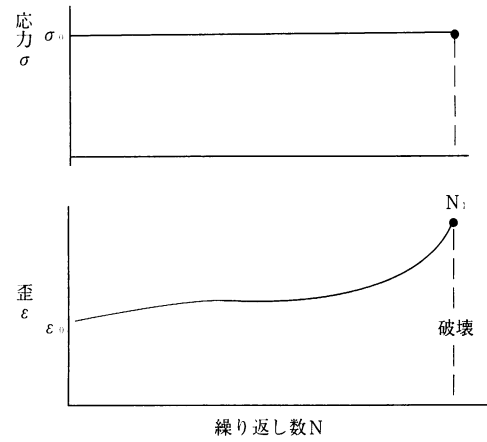


図23 一定応力による疲労

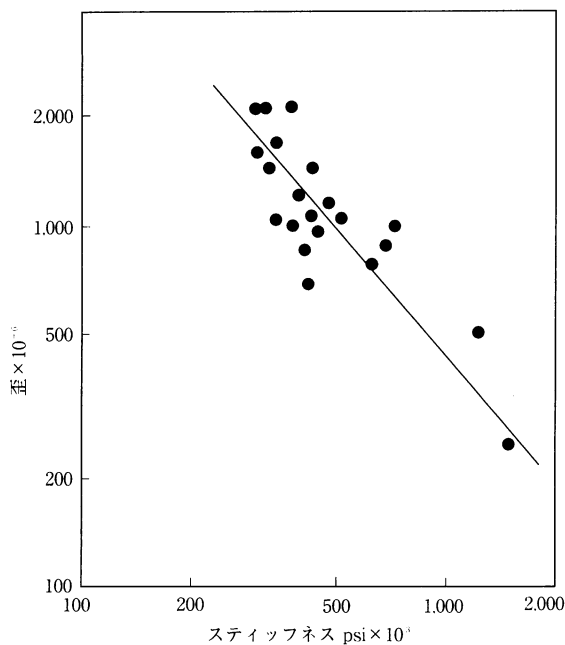


図21 破壊時の歪とステイフネスの関係

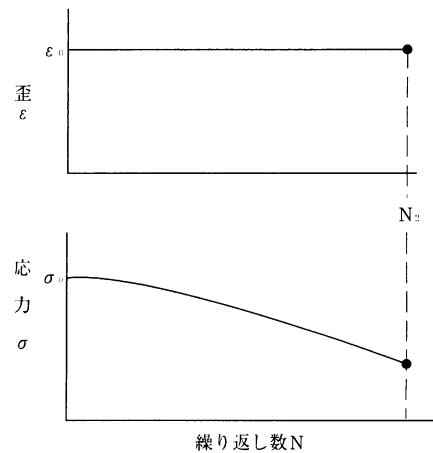


図24 一定歪による疲労

度の間には相関関係がほとんどないと言えよう。すなわち、ステイフネスの大きい混合物が、必ずしも引張強度が大きいとは限らないわけである。一方、破壊歪について言えば、ステイフネスの大きいものほど破壊歪が小さくなる傾向がはっきり現われている。

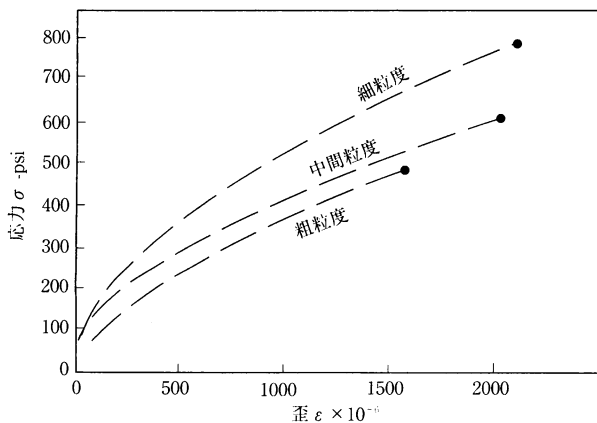


図22 応力-歪曲線に与える骨材粒度の影響

(4)骨材粒度の影響

図22は、Eppsら⁸⁾が粒度の異なる3種類の混合物について直接引張試験から求めた応力-歪関係である。直線関係ではないから、完全な弾性体とは言えないが勾配がほぼ一定になったところで接線をとってみると、20,000kg/cm²前後の値が得られる。試験温度20℃であるから、常温におけるステイフネスの目安になるかと思う。粒度については、細粒になればなるほど、引張強度も破壊時の歪も大きくなる。すなわち、クラック防止の立場から見れば細粒が有利と思われる。なお、この実験での引張強度は450~800psi (30~55kg/cm²)、破壊時の歪は1500~2000×10⁻⁶が図から読みとれる。

ファイラー量は、アスファルトの3~4倍程度までは、

多く入れれば入れる程、引張強度は大きくなるようである。しかし、これはアスファルト量とのかねあいもあるが、細粒で引張強度の大きい傾向を、強く拡大したものとも見ることができよう。

7. アスファルト混合物の疲労特性

アスファルト舗装は常に大小さまざまな輪荷重にさらされ、クラックの発生から破壊に結びつくため、材料の疲労についてはかなり古くから研究されてきた。しかし、今日に至っても研究はまだ未完了であって、定量的な整理はかなり難しい。これは、アスファルト混合物の疲労特性に影響する要因がきわめて多く、さらに要因と要因の間に相互作用があったりして、実験結果の解析を困難にしているからである。言いかえれば、各研究者の発表する実験データのの一つ一つが条件を非常に限定した特殊な例であって、実験データの比較が難しいのである。しかし、定性的には多くの研究者が一致して認めている部分もかなりあるので、本章ではその概略を紹介することにする。

疲労の試験には一般に曲げ試験が利用されている。そして、外力を応力で与えるか歪で与えるかによってアスファルト混合物の挙動はかなり異なった結果を示す。

図23は一定応力を繰り返し与えた場合、載荷回数によって歪の変化する様子を模式的に示したものである。歪は徐々に大きくなり、ある回数を超えると破壊してしまう。一方、一定歪を与えた場合には図24のように、応力が徐々に減少する傾向にある。なお、一定応力の場合の最初の歪を初期歪、一定歪の最初の応力を初期応力と呼び、実験データは、これらの初期値で示されるのが普通である。

一定応力 σ による破壊までの繰り返し数 N_1 と一定歪 ε による繰り返し数 N_2 の間には、一般に次のような関係のあることが数多くの実験によって確認されている。

$$\begin{cases} N_1 = K_1 \sigma^{n_1} \dots \dots (6) \\ N_2 = K_2 \varepsilon^{n_2} \dots \dots (7) \end{cases}$$

これは、両対数紙上で N_1 と σ 、 N_2 と ε がそれぞれ直線関係にあることを示しているが、 n_1 、 n_2 はその勾配であり、 K_1 、 K_2 はアスファルト混合物の性質によって決まる定数である。

(6)、(7)式は、全く同一の形をしておるため、いずれの実

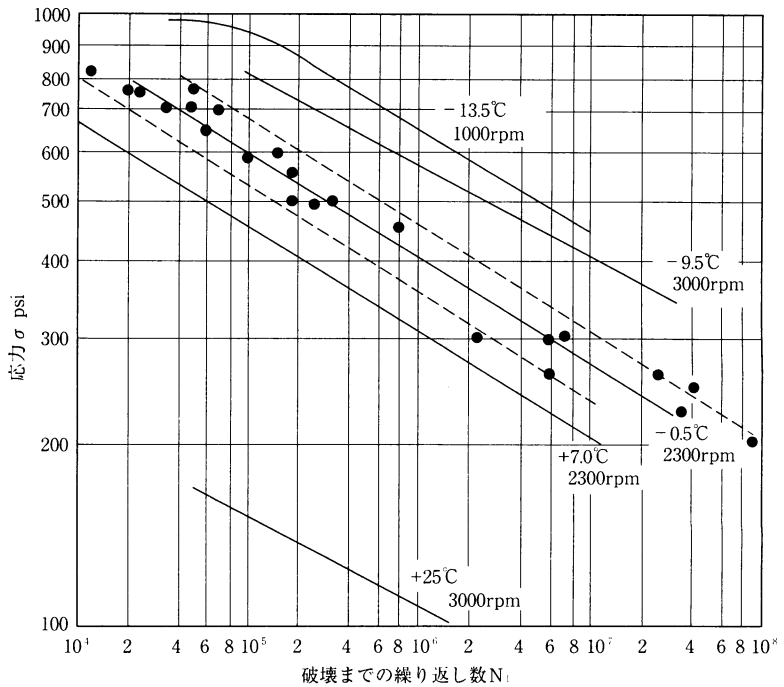


図25 応力制御による疲労 (Dell)

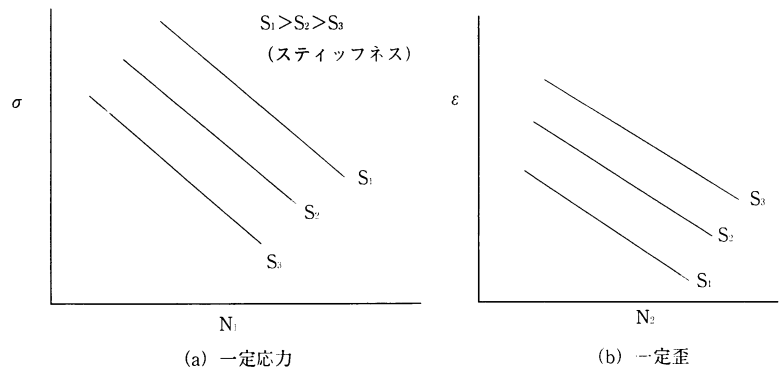


図26 スティッフネスの疲労に与える影響

験方法をとっても差はないように思えるが、材料的性質の面から見ると両者は根本的に相反する立場にある。すなわち一定応力の試験で N_1 の大きい材料（寿命の長い材料）は、一定歪の試験では逆に N_2 が小さくなるのである。

図25はPell⁹⁾が一定応力で行なった実験結果である。グラフ上で上方にある材料ほど寿命が長いわけであるが、表層材料が上方にあり路盤材料は下方に位置している。この上下関係を左右する主要な要因は、材料のスティッフネスであることが多くの研究者によって確認されてきた。図26 (a) (b) は、一定応力、一定歪の試験値に対するスティッフネスの影響を模式的に示したものであるが、前者に対しては、スティッフネスの大きいもの、後者に対しては逆にスティッフネスの小さいものが有利な結果を与えている。Pell¹⁰⁾はこの理由を次のように破壊の形態が異なるからであると説明している。すなわち、

一定応力の繰り返し曲げ試験においては、クラックが発生すると応力集中によりクラックの先端の応力が増加してクラックの伝播速度が急に速くなり供試体の完全な破壊に到るが、一定歪の試験では、クラックの発生は応力を減少させ、伝播速度はおそくなるというのである。

このように、スティッフネスが疲労破壊の支配的要因である以上、他の要因はほとんどスティッフネスに与える影響として考察することができる。たとえば硬いアスファルトの使用、温度の低下、载荷速度の増加等、スティッフネスを大きくする要因は、 N_1 の増加(N_2 の減少)に寄与することになる。

以上のように室内実験では、二つの相反する方法によって、かなり多くの情報を積み重ねてきているが、現実の舗装が受ける外力は、一定応力、一定歪等ではあらわせない複雑なものであり、タイムスケールも長く、さらに環境(温度等)もかなり変化に富んでいる。室内実験と現実のギャップを埋める方向での研究が今後の大きな課題となるであろう。

8. おわりに

アスファルト誌の読者層は非常に幅が広いので、どの程度の内容にすればよいのか非常に迷うところである。技術者だけに限っても、化学系と土木系の非常に異なった分野の人達が対象になるから、一方には常識程度のことでも他方にはきわめて理解しにくい内容となる。本稿の第3章などは、その代表的な例であろう。諸先輩をはじめ、読者の方々の御批判をいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 高速道路調査会「アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書」P.193, 1976年2月
- 2) 土木学会編「土木工学ハンドブック」P.868, 技報堂
- 3) Y.M.Salam et al. "Fracture Characteristics of Asphalt Concrete" AAPT, Vol.41, 1972,
- 4) C.R.Marek, "Estimation of the Tensile Strength of Asphalt Cements in Thin Films" Journal of Materials P.3, Vol.5, No.1, 1970
- 5) H.R.B. "Factors involved in the design of Asphalt Pavement Surfaces" NCHRP Report No.39, P.25
- 6) C.L.Monismith et al. "Rheologic Behaviour of Asphalt Concrete" AAPT Vol.35, 1966, P.400
- 7) Van der Poel, "A General System Describing the viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data" Journal of Applied Chemistry, May 1954
- 8) J.A.Epps et al. "Influence of Mixture Variables on the Direct Tensile Properties of Asphalt Concrete" AAPT Vol.39, 1970, P.207
- 9) P.S. Pell "Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes" Proc. of the 1st International Conf. of the Structural Design of Asphalt Pavement, P.310 (1963)
- 10) P.S. Pell "Fatigue of Asphalt Pavement Mixes" Proc. of the 2nd International Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, P.577 (1972)

☆

☆

☆

☆

☆

☆