

## アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究

## STRAIN AT FAILURE OF BITUMINOUS MIXTURES

上 島 壮\*・森 吉 昭 博\*\*・菅 原 照 雄\*\*\*

By Tsuyoshi Kamijima, Akihiro Moriyoshi and Teruo Sugawara

## 1. ま え が き

本論文はアスファルト混合物の破壊現象を破壊時のひずみの角度から論じたものである。すなわち、本論文はアスファルト混合物について広範囲にわたる載荷条件下で曲げ試験、曲げクリープ試験、一軸圧縮試験等を行ない、応力～ひずみ曲線をもとに破壊時のひずみが温度、ひずみ速度などの外的条件によりいかに変化し、いかなるレベルにあるかを粘弾性学的に考察するとともに、アスファルト混合物を利用する構造の力学解析、構造設計およびパフォーマンス評価に資することを目的としたものである。

アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究としては、Monismith, Heukelom, Eriksson<sup>1)</sup>らが主として引張試験からぜい性領域におけるアスファルト混合物の性状を検討したものがあげられるが、これらは単にアスファルト混合物の破壊のごく一部の領域について述べているにすぎない。

したがって筆者らは本論文で各種のアスファルト混合物の破壊時のひずみについてぜい性領域における破壊、流動を伴う破壊、これらの境界における破壊、クリープ破壊を中心に疲労破壊、実際の舗装にみられる展性ともいうべきニーディングを伴う伸びによる破壊など種々の現象に関し、マクロな見地から実験的考察を行なったものである。

なお筆者らは先に<sup>2)</sup>アスファルト混合物の破壊強度について論じたが、本論文はそれと完全に対応しており、破壊のモードに関してはすべてその研究の成果を利用している。

本論文の末尾において好対称をなすアスファルト混合

物の破壊の2つの要因、すなわち強度およびひずみについて考察を加え、筆者らの見解を試論としてとりまとめてみた。

## 2. アスファルト混合物の破壊

アスファルト舗装はその使用材料が粘弾性状を呈することを利用して道路舗装、空港舗装および水利用構造物としいにその応用範囲を拡大しつつある。それに伴い今まで道路舗装に適用されていた考え方が、各種利用対象物にまで拡大適用できるか否かが、それらの設計上非常に重要な問題となることが、最近舗装研究者により指摘され始めてきている<sup>3)</sup>。

このような各種利用対象物にアスファルト混合物を応用する際、力学的な見地から検討を要すると思われる“ひずみ”としては次の5つが考えられる。

1. 低温領域で比較的速い速度の荷重を受けたときの破壊時のひずみ（ぜい性破壊のひずみ）
2. 高温領域で比較的遅い速度の荷重を受けたときの破壊時のひずみ（流動を伴う破壊のひずみ）
3. 比較的高温時においてきわめて長い時間荷重を受けたときの破壊時のひずみ（クリープ破壊のひずみ）
4. 繰返し荷重を受けたときの破壊時のひずみ（疲労破壊）および繰返し荷重を受けても破壊しないひずみ（ここでは耐久限度のひずみと定義する）
5. 繰返し荷重によりたえずニーディング作用を受けたとききれつなしで舗装が変形できる限界のひずみ（展性が期待される領域の破壊時のひずみ）

これら5種の破壊現象（または破壊時のひずみ）はレオロジー的な立場からみると全く異なった現象であり、破壊時のひずみのレベルが各破壊現象により著しく異なることがそれを裏付けている<sup>4)</sup>。

本研究は以上述べたごとく道路への利用以外のものを

\* 正会員 北海道大学 助手 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 北海道大学 助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 北海道大学 教授 工学部土木工学科

も含めた各種アスファルト舗装に適用できる破壊現象の一般論について、主としてぜい性領域と延性領域における破壊ひずみに関し材料学的に詳細に実験的な考察を加え、さらに通常の舗装にみられるニーディング作用を伴うとき舗装が大変形（破壊ひずみがきわめて大きい）に耐える現象ならびに繰返し载荷に伴う疲労破壊等におけるひずみが上に述べた破壊現象といかなる関係にあるかを考察したものである。

### 3. 研究の概要

本研究では先にあげた5つの破壊のモードに関し、それぞれ次に述べるような実験および考察の方法を採用した。

- 1) 低温領域における高速破壊（ぜい性破壊）—低温でのひずみ制御による曲げ試験
- 2) 常温以上での破壊—ひずみ制御による曲げ試験、引張試験および一軸圧縮試験
- 3) 高温かつ長時間载荷領域における破壊（クリープ破壊）—各種のひずみ速度における曲げクリープ試験
- 4) 著者らのもつ一部のデータならびに既往の研究の考察ならびに解析
- 5) 実際に道路上で生じている舗装の観察ならびにホイールトラッキング試験による実験室内での観察

### 4. 実験方法

#### (1) 使用材料および使用混合物

本研究に使用したバインダーの主な性状と混合および転圧時の温度を表-1に示す。

使用混合物の配合表を付表-1に示す。

表-1 バインダー性状表

| バインダー名                       | 針入度<br>( $25^{\circ}\text{C}$ ,<br>5 sec,<br>100gr) | 軟化点<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 針入度<br>指数<br>P.I. | 混合時の<br>温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 転圧時の<br>温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------------------------|---|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| ストレートアス<br>ファルト A            | 81  | 47.3                          | -0.7              | 139.0                                | 101.0                                |
| 同 B                          | 98  | 43.8                          | -1.2              | 134.0                                | 91.5                                 |
| ストレートアス<br>ファルト<br>+SBR 5% C | 70  | 63.5                          | +2.5              | 208.0                                | 139.0                                |
| ストレートアス<br>ファルト D            | 93  | 47.8                          | -0.2              | 160.3                                | 104.5                                |

#### (2) 供試体作製法

材料は表-1に示す温度（2ポアズ温度）で混合したのち  $30 \times 30 \times 5$  cm の型枠に入れ、所定の温度（30ポアズ温度）でローラーコンパクトを用いて転圧し、さら

に均一な密度を得るためホイールトラッキング試験機によりニーディング作用を与えた。

曲げ試験、曲げクリープ試験および引張試験の試料はこの供試体よりカッターを用い、 $2.5 \times 2.5 \times 25$  cm の大きさに切りだしたものを用いた。またマッシュクアスファルト系の供試体は  $2.5 \times 2.5 \times 25$  cm の型枠に混合物を流し込んで得たものである。

一軸圧縮試験には  $3.5 \times 3.5 \times 8$  cm の切りだし供試体を使用した。

#### (3) 各種試験の方法ならびに解析法

本研究では単純曲げ試験、曲げクリープ試験、一軸圧縮試験および引張試験を採用した<sup>5)</sup>。これらの試験条件は表-2に示すとおりである。

表-2 各種試験の実験条件

| 試験法      | ひずみ速度<br>(1/sec)                                  | 変位速度<br>(mm/<br>min) | 試験温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 供試体寸法<br>(cm)                          |
|----------|---|----------------------|--------------------------------|--|
| 単純曲げ試験   | $1.7 \times 10^{-4}$<br>~ $4.9 \times 10^{-1}$    | 2.7~7 800            | -10~30                         | $2.5 \times 2.5 \times 25$<br>(スパン長20) |
| 一軸圧縮試験   | $9.0 \times 10^{-3}$                              | 43                   | -25~20                         | $3.5 \times 3.5 \times 8$              |
| 引張試験*    | $5.5 \times 10^{-4}$<br>~ $2.2 \times 10^{-2}$    | 66~260               | 5~20                           | $2.5 \times 2.5 \times 25$             |
| 曲げクリープ試験 | $2.8 \times 10^{-6}$<br>~ $5.0 \times 10^{-4}$ ** | —                    | 15~40                          | $2.5 \times 2.5 \times 25$<br>(スパン長20) |

\* 本試験は供試体の両端をチャックで締めつけ一定ひずみ速度で伸長させる方法である。

\*\* ひずみ速度は平均ひずみ速度を示す。なお本試験の応力範囲は  $0.2 \sim 7.2$  kg/cm<sup>2</sup> である。

引張試験および一軸圧縮試験は供試体の保持、供試体端部の影響およびひずみ速度の幅などの制約により、流動を伴う領域はともかくとして特にぜい性領域において良い結果が得られなかった。この点については実験精度の向上をも含め今後の課題であると考えられる。

以上のような理由で、本研究では比較的試験が簡単にかつスパンならびに供試体寸法を変化させることにより、ひずみ速度を広範囲に変化させることのできる曲げ試験を中心として種々の条件で試験を行なった。

曲げ試験では  $10^{-4} \sim 10^{-1}$ /sec なる4オーダーにわたるひずみ速度を設定したが、この一番大きいひずみ速度は Tons および Krokosky<sup>1)</sup> が引張試験で行なった一番大きいひずみ速度のほぼ10倍に相当する。このように広範囲なひずみ速度を設定したのは車両走行時に舗装体下面に生ずるひずみ速度からクリープ破壊でのひずみ速度に接するひずみ速度までを対象としたためである。

曲げ試験には両端単純支持、中央集中荷重方式を採用し、実験には高速曲げ試験機、インストロン型万能試験機およびオルゼン型万能試験機を用いた。曲げ試験における混合物の破壊は荷重が最大となる点を破壊点とし、このときの強度およびひずみを曲げ強度および破壊時のひずみと定義し、これらを弾性解により求めた。

曲げクリープ試験は両端単純支持方式であり、実験にはインストロン型万能試験機を使用した。荷重制御は自重のみまたは自重と中央集中荷重を与えるクリープアダプターを併用し、载荷する方式を採用した。混合物の破壊は変位～時間曲線における第2期クリープの直線部よりはずれる点を破壊点とした<sup>6)</sup>。

以上の解析において単純曲げ試験および曲げクリープ試験より得られるひずみは高温領域において真のひずみを表現しているとはいいがたいので、ここでは両試験から得られる高温かつ長時間载荷領域における破壊時のひずみを破壊ひずみ係数なる名称で呼ぶこととする。

一軸圧縮試験および引張試験における混合物の破壊の定義および解析法は曲げ試験に準じた。

### 5. 実験結果ならびに考察

#### (1) 破壊強度と破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）の関係

曲げ試験、一軸圧縮試験および引張試験の各試験より得られる破壊強度（または破壊時のひずみ）と温度との関係は 図-1 に示すごとくすでに先の論文<sup>2)</sup>で概念的に示したが、本論文ではそれらをさらに広範囲にかつ基礎的に論じようとするものである。

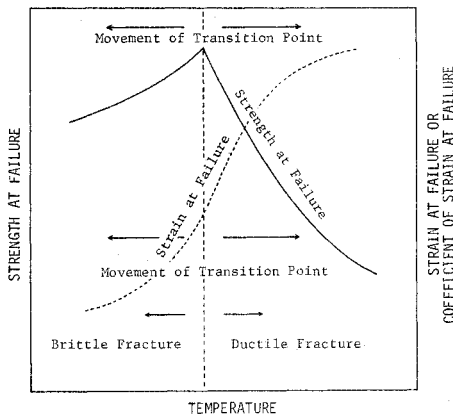


図-1 破壊強度（または破壊時のひずみ）と温度との関係

筆者らが本研究に使用した配合の供試体をも含め約5000個を超える供試体から得られた実験結果を総合し、マクロな見地から考察すると破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）～温度曲線は 図-2 に示すごとく緩やかなS字を描き、混合物の配合、バインダーの性状およびひずみ速度の変化に伴いこの曲線は温度軸に平行に左右に移動することが確かめられた。この性質はアスファルト混合物の基本的なものであると考えられる。菅原<sup>7)</sup>はこの点について概念的に論じているが、筆者らの

研究によると破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）に上限値および下限値が存在し、それぞれ  $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 、 $10^{-3}$  の値に収れんすることが見出されている。図-3 は

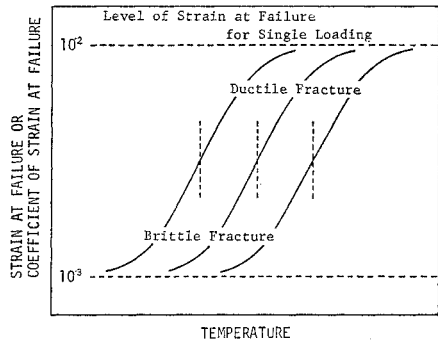


図-2 破壊時のひずみと温度との関係

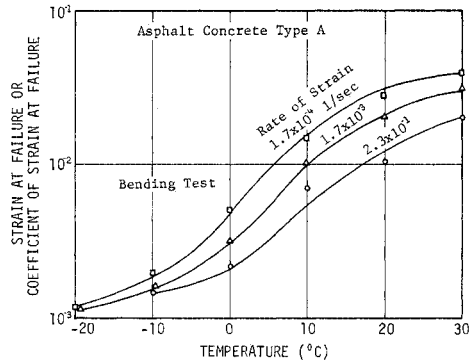


図-3 破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）と温度との関係

アスファルトコンクリートタイプAの混合物についてひずみ速度を変化させて曲げ試験を行なったときの結果を示している。

このようにひずみ速度が変化しても破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）と温度との関係は温度軸に平行に左右に移動するだけで曲線の形はほとんど変化しないことから、ひずみ速度が変化したときこれら破壊強度や破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）がいつも一定値を有するかどうかを曲げ強度～破壊時のひずみの関係から検討し、その結果を 図-4 に示す。

これより曲げ強度～破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）の曲線の形はひずみ速度が変化しても混合物の配合やバインダー性状が同一なら変化せず、ある破壊時のひずみのとき曲げ強度は極大値を有するといういわゆるピークを示す現象があらわれる。

きわめて小さいひずみ速度でのクリープ破壊のひずみ量を求める目的で工藤・菅原<sup>8)</sup>はこれと類似の研究を行っているが、この結果は非常に大きいひずみ速度から小さいひずみ速度まで広範囲にひずみ速度を網羅している。このようにひずみ速度を広範囲に変化させても曲げ

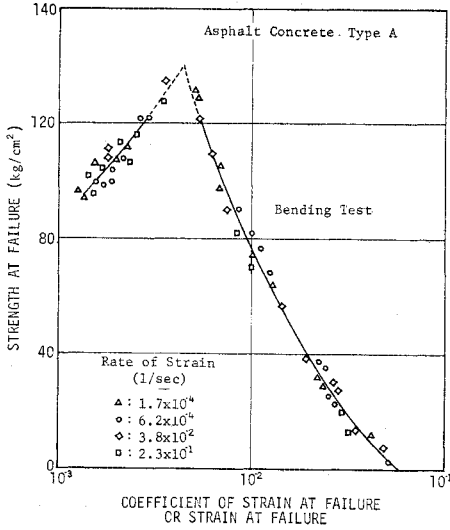


図-4 曲げ強度と破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）との関係

強度と破壊時のひずみ（または破壊ひずみ係数）との関係は変化しないことを説明しており、本研究においてきわめて重要な意味をもつものである。

破壊強度が極大値を有する点を境としてこれより低温および高温領域においては破壊の形式が著しく異なり、この点より高温側では流動を伴う破壊領域、低温側ではぜい性破壊領域、この点の付近では転移領域の破壊と定義したことはすでに先の論文で述べた<sup>2)</sup>。

本研究では各領域における破壊時のひずみのレベルや車両走行を受けた場合の舗装の破壊時のひずみのレベルについて各種実験を行ない、それから得られた結果について以下に述べることにする。

(2) 単一載荷による破壊

a) ぜい性領域の破壊時のひずみ

図-5 はひずみ速度  $4.9 \times 10^{-1}$  /sec においてサンドアスファルトタイプの混合物を用い、バインダー性状を変化させたときのぜい性領域における破壊時のひずみと温度との関係を示す。いずれの混合物も低温領域では破壊時のひずみは  $1.0 \times 10^{-3}$  近辺の値に収れんし、使用したバインダーの性状には依存しない。

図-6 はぜい性領域において曲げ試験から得られる破壊時のひずみが混合物中の骨材体積率によりいかに変化するかを示したものである。図より一般道路用混合物とマッシュ系混合物の場合では破壊時のひずみの数値は著しく異なり、一般道路用混合物でその値はほぼ  $1.0 \times 10^{-3}$  のオーダーにあるといえるがマッシュ系の混合物の破壊時のひずみはこれより多少大きな値となり、 $(2.0 \sim 5.0) \times 10^{-3}$  程度となる<sup>3)</sup>。

以上の研究とは別に Monismith<sup>4)</sup> らはアスファルト

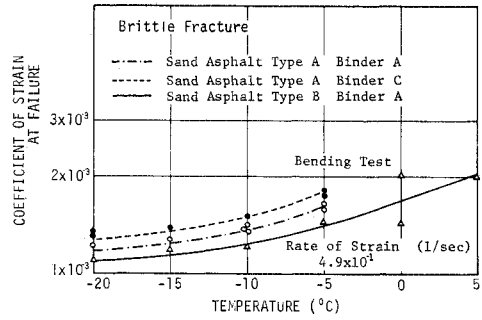


図-5 ぜい性領域における破壊時のひずみと温度との関係

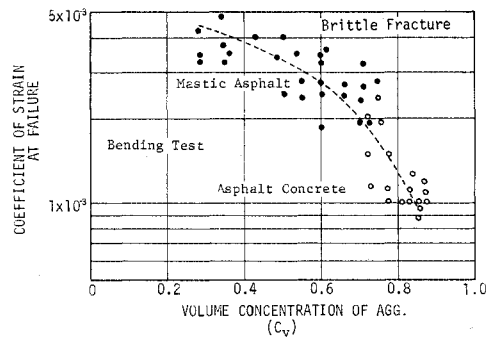


図-6 ぜい性領域における破壊時のひずみと骨材体積率との関係

混合物のぜい性領域における破壊時のひずみが  $10 \times 10^{-4}$  程度となることを引張試験から示している。この値は本研究の曲げ試験より得られた値とよく一致しているといえる。

また実際問題との関連をみるに道路舗装では単一載荷による破壊は考えられないが、きれつ発生の最初の段階において意味をもち、また材料の基礎的な性状を論ずるにはこの領域での破壊ひずみの大きさはきわめて重要な意味をもつと思われる。

b) 流動を伴う破壊領域のひずみ（クリープ破壊時のひずみ）

図-7 はストレートアスファルトを使用したサンドアスファルトタイプの混合物について流動を伴う破壊領域において種々のひずみ速度で曲げ試験を行ない、ひずみ速度と破壊ひずみ係数との関係を示したものである。これよりひずみ速度が小さくなるとともに破壊ひずみ係数は少し大きくなる傾向にあるが、その上限値はほぼ  $(6 \sim 10) \times 10^{-2}$  と考えてよいと思われる<sup>4)</sup>。

この考え方が他の試験法についても適用可能かどうかを検討するためサンドアスファルトタイプの混合物とアスファルトコンクリートタイプの混合物を用いて一軸圧縮試験、引張試験および曲げ試験を行なった。これらの結果を図-7, 8 に示す。

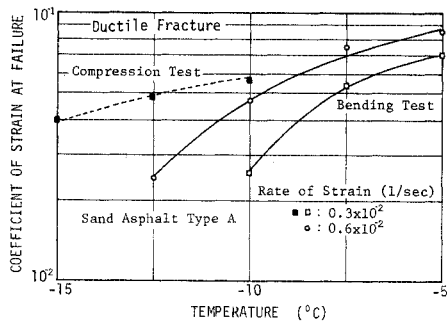


図-7 流動を伴う領域の破壊ひずみ係数（または破壊時のひずみ）と温度との関係

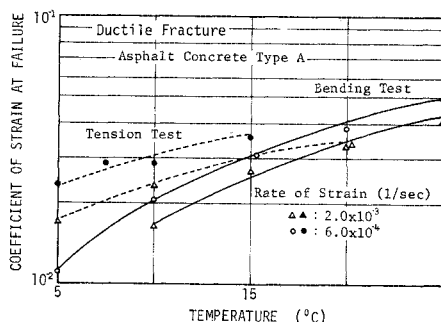


図-8 流動を伴う領域の破壊ひずみ係数（または破壊時のひずみ）と温度との関係

ひずみ速度の大きさごとに流動を伴う破壊領域の破壊ひずみ係数および破壊時のひずみは明らかに変化するが、試験法が異なってもこれら混合物の破壊時のひずみおよび破壊ひずみ係数には上限値らしきものが認められ、かつこれらの数値は試験法に依存せず粗骨材を含まない混合物では  $(6\sim 10) \times 10^{-2}$  付近の値に収れんする傾向にある。

図-9 は配合の異なる4種のアスファルトコンクリートタイプの混合物について曲げ試験および曲げクリープ試験を行ない、破壊ひずみ係数と曲げ強度および曲げクリープ時の応力との関係を強度および応力が  $60 \text{ kg/cm}^2$  以下となる実験値のみについて示したものである。図よ

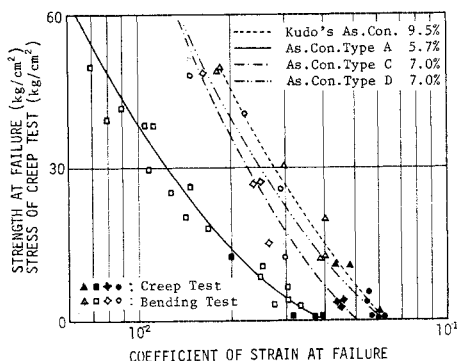


図-9 破壊ひずみ係数と曲げ強度または曲げクリープ時の応力との関係

り明らかなごとくバインダー量の増加とともに破壊ひずみ係数は大きくなり、水利構造用物のアスファルトコンクリートタイプCおよびEの混合物では破壊ひずみ係数の上限値は  $6 \times 10^{-2}$  にも達する<sup>4)</sup>。しかしアスファルトコンクリートタイプDと同一のバインダー量を有し、ファイラー分の多いアスファルトコンクリートタイプCの混合物の上限値はこれより小さく  $5 \times 10^{-2}$  となり、一方一般道路用混合物であるアスファルトコンクリートタイプAのそれは  $4 \times 10^{-2}$  程度となる。

以上を要約すると流動を伴う破壊領域の破壊時のひずみは粗骨材を含まない混合物で  $(6\sim 10) \times 10^{-2}$  に、一方粗骨材を含む混合物ではバインダー量の変化に伴い  $(4\sim 6) \times 10^{-2}$  程度の値となる。この領域のひずみはたとえば水利用構造物における基盤の沈下などの舗装への影響を論ずるうえで重要であり、また車両走行のない道路舗装でのきれつ現象を論ずるのに有用と思われる。

### (3) 車両により繰返し載荷を受ける場合の破壊に関する考察

#### a) 疲労破壊において考察すべきひずみレベル

アスファルト混合物に限らず一般の材料は繰返し載荷を受けると疲労により破壊する。この現象についてその材料に与えるひずみレベルと破壊までの繰返し回数との関係を論じている研究者も多い<sup>9)</sup>。この考え方は疲労破壊を生ぜしめる限界のひずみが（ここでは耐久限度のひずみと呼ぶ）その材料に与えたひずみと破壊までの繰返し回数とで描かれる直線の折れ曲った点でのひずみであるとするとのである。アスファルト混合物についてこの耐久限度のひずみまでおよんだ研究例は Dormon<sup>10)</sup> によるもののみである。多くの疲労研究の実験例によると与えるひずみは破壊までの繰返し回数が  $10^2\sim 10^7$  回まででは  $10^{-3}\sim 10^{-5}$  のレベルにあることが確認されているので、耐久限度のひずみはこの値をかなり下回っていると考えてよいであろう。

一方、実際の舗装内部に生ずるひずみは予測される大荷重に対して  $10^{-5}$  近辺のレベルにあるものが多いといわれ<sup>11)</sup>、いずれの場合も  $1 \times 10^{-4}$  の値を下回るのが実際の状態である<sup>12)</sup>。

笠原・菅原はアスファルト混合物の動的応答と疲労に関し、既往の文献の整理を試みその研究の現状および将来の方向を明らかにするとともに、その工学的な意義を明らかにし<sup>13)</sup>、さらに動的応答に関する研究<sup>14)</sup>の中で注目すべきひずみの領域を明らかにした。また  $10^{-3}$  のひずみレベルでは前項までに述べたように通常の道路舗装が遭遇する温度、ひずみ速度範囲で Single Loading により破壊することから、疲労を実用的に論ずる領域はこれより下にあることが考えられる。

さらに菅原・笠原の疲労破壊に対する研究の結果からおよそ次のことが明らかにされた（詳細は近く発表の予定）。すなわち、2°C、12°Cにおいて10 Hzのサイン波を $2 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-4}$ 、 $6 \times 10^{-4}$ 、 $8 \times 10^{-4}$ の各ひずみにおいて加え（10 Hzなる周波数では2°Cはぜい性破壊領域にあり、一方12°Cは延性破壊領域にある）、混合物中のバインダーの量、性状および骨材の表面性状を変化させて広範囲な実験を行なった結果、2°Cにおいて $3 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4$ の疲労破壊回数が得られ、また12°Cでは $3.9 \times 10^3 \sim 3.7 \times 10^5$ 以上という結果が得られた。この結果はアスファルト混合物に $10^{-4}$ レベルのひずみを繰返し加えた場合疲労破壊回数はその材料配合、与えるひずみ、温度などにより著しく異なることを明らかにしていると考えてよいであろう。

以上の実験結果ならびに既往の研究に基づく考察よりアスファルト混合物の耐久限度のひずみレベルは $10^{-5}$ 以下にあることが予想される。しかし、アスファルト混合物の変形および流動特性を考えると $10^{-5}$ のひずみレベルで $10^8$ 回以上の繰返し載荷を混合物に与えることは現在の実験技術ではきわめて困難であり将来の研究の進展が待たれる。

#### b) 繰返し車両走行をうけるアスファルト混合物の伸び（展性が期待される領域の破壊ひずみ）

アスファルト舗装でもたえず車両走行のある場合と全くない場合ではきれつが生じ方が著しく異なることはよく知られている。すなわち、前者の場合は舗装体中に生ずる微細なきれつがひきつづく車両走行のニーディング作用により消され（Healing現象）、このため車両直下のアスファルト混合物は若干側方へ流動し、結果的には厚みが減少して横に伸びた現象となる。したがってこの性質は他の領域での破壊ひずみとは若干性格を異にしている。ここで破壊ひずみは材料がひろがりきれなくなったり、その部分の厚みが小となって構造的な強さを失うときに示される。一方後者の場合にはこのような伸びとひろがりとは全く期待できず、材料自身の伸び限度しか期待できないとすべきであろう。

前者のような現象は金属材料でいう展性に似た現象と考えるべき性質のものであろう<sup>9)</sup>。神崎<sup>10)</sup>らの行なったホイールトラッキング試験において、長時間かつ高温時の供試体（厚み5~6 cm）のわだち部分の変形量は2~3 cm（ひずみ $3 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$ ）にも達し、この量は粗骨材を含まない混合物では特に顕著であり、かつこのような大変形時においてもわだち部分にはきれつが生じていないことが明らかにされた。したがって、混合物のポアソン比をかりに0.5と仮定すると縦方向および横方向のひずみはともに $10^{-1}$ のレベルとなる。このような現象はアスファルト舗装が実質的にニーディング作用を伴

ったときは大きなひずみに耐え、一方車両走行のない舗装は大きなひずみに耐えられなくなりきれつを生ずるといふ現象をよく説明するものである。水利構造物用の舗装などが大きなひずみに耐えたいことはこの展性が全く期待できないことに基づいているからであろう。

## 6. 破壊強度と破壊ひずみ

著者らは先にアスファルト混合物の破壊強度について論じたが<sup>2)</sup>、それと本研究の結果とを対応させ、かつ舗装構造に関連させて考察し以下に述べる見解を得た。

アスファルト混合物の破壊のレオロジーに関しては強度から論ずるものと破壊ひずみから論ずるものがあるが、前者における破壊強度のレベルは高温、長時間載荷時における場合を除き一般に舗装に生ずると思われる応力レベルよりもはるかに上にあると考えられ、またそのぜい化点での強度の変化幅は各種の混合物を通じてほぼ似た値、約100~140 kg/cm<sup>2</sup>の範囲にある。したがって強度をもってその性状を判断することはきわめて困難であり、また舗装にその論のみを適用して構造設計およびパフォーマンスを論ずることは困難といわなければならない。これに対し、破壊ひずみは前述のように温度、載荷条件ごとにきわめて変化に富み各破壊現象ごとに典型的な数値を示しているといえる。この意味をもってすればある条件下においてある混合物がいかなる破壊ひずみをもつかは舗装において構造の設計、パフォーマンス評価により大きな意味をもちきれつを主とした諸現象の解明に有用な指針を与えられると思われる。これらの結果はそれぞれアプローチの方法が異なるにもかかわらず、

a. Hveem<sup>16)</sup>が実用研究の結果明らかにした舗装評価への沈下量の導入（これはすでに定説となった）および設計における限界沈下量の設定（これは耐久限度のひずみを意味する）。

b. Dormon<sup>10)</sup>らの許容破断ひずみ（Permissible Strain）論

ともよく符合するものとなっている。

## 7. ま と め

以上アスファルト混合物に関し、主として曲げ試験、曲げクリープ試験、一軸圧縮試験および引張試験より破壊時のひずみのレベルに各種の検討を加え、さらに既往の研究に基づいて種々の考察を試みた。

本研究で得られた主な結論を一般道路用混合物について要約すると次のとおりである。

(1) ぜい性領域における混合物の破壊時のひずみは試験法、バインダー性状に依存せず $1 \times 10^{-3}$ 近辺のレベ

ルにある。

(2) 混合物の性状が流動を伴う破壊領域からぜい性破壊領域またはその逆に変化する時、これら両領域の転移領域における破壊時のひずみは  $(4\sim6) \times 10^{-3}$  のレベルにある<sup>8)</sup>。

(3) 混合物が高温でかつ長時間外力を受ける場合、混合物はクリープ破壊するがこのときの破壊時のひずみは  $10^{-2}$  のレベルにあり、この値はひずみ速度が同一なら試験法に依存しない。

(4) 車両走行により舗装にニーディング作用が期待される場合、混合物の破壊時のひずみ(伸び)は  $10^{-1}$  のレベルにあると思われるが、この値は配合や骨材寸法に依存する。

(5) 舗装が車両走行により疲労破壊するときのひずみレベルは配合、温度などにより変化するがほぼ  $10^{-4}$  以下のレベルにある。

(6) 舗装が車両走行による繰返し载荷を受けても混合物が疲労破壊しないといういわゆる耐久限度のひずみは  $10^{-5}$  以下のレベルで検討されるべきである。

(7) 以上述べた結論を一般の破壊の分類法と対比させると表-3 が得られる。これよりアスファルト混合

表-3 破壊時のひずみのレベル

| 一般の分類法 | 破壊時のひずみ                      | 破壊の形式                   | 注        |
|--------|------------------------------|-------------------------|----------|
| 延性領域   | $10^{-1}$                    | 展性が期待される領域(ニーディング作用による) | 動的交通荷重あり |
|        | $10^{-2}$                    | 流動を伴う破壊領域               |          |
| 転移領域   | $(4\sim6) \times 10^{-3}$ ** |                         | ぜい化点     |
| ぜい性領域  | $10^{-3}$                    | ぜい性破壊領域                 | 動的交通荷重あり |
|        | $10^{-4}$                    | 疲労破壊領域                  |          |
|        | $10^{-5}$                    | 疲労破壊しない領域               |          |

\* 一般道路用混合物を対象とした場合

\*\* 転移領域に関しては単にレベルのみを示す

物で検討を必要とするひずみは5オーダーにまたがり、各レベルごとに破壊の形式が著しく異なることが理解される。

(8) 各破壊現象での破壊時のひずみについて混合物の配合、バインダーの性状などの見地から以上の結果をもとにさらに詳細な検討が必要であり、今後これらが重要な研究事項となろう。

また先の筆者らの破壊強度に関する研究<sup>2)</sup>において見出された特性と、この破壊ひずみに関する研究において見出された事項は完全な対応関係にある。さらに、ここに述べた以外にも破壊現象には諸種の因子に基づくきわめて興味ある規則性がいくつか見出されたが、ここにおいては詳細に論じられなかった。これらに関しては機会

を改めて論ずる予定である。

本論文は北海道大学工学部におけるアスファルト混合物の破壊を研究するグループ、すなわち下田哲也、笠原篤、石井哲夫、岡田和夫、松浦精一および著者ら3名の研究成果であり、著者ら3名が主としてとりまとめにあたったものであることを付記する。以上記して関係者各位に厚く感謝の意を表するものである。

なおこの研究は文部省科学研究費の交付を受けて行なった。

付表-1 混合物の配合表

| ふるい目の開き(mm) | 混合物の名称                |                       |                       |                       |                       |                      |                      |                     |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|             | アコ<br>スクイ<br>アリ<br>トA | アコ<br>スクイ<br>アリ<br>トB | アコ<br>スクイ<br>アリ<br>トC | アコ<br>スクイ<br>アリ<br>トD | アコ<br>スクイ<br>アリ<br>トE | サフ<br>タイ<br>アル<br>ドA | サフ<br>タイ<br>アル<br>ドB | マス<br>フ<br>タル<br>クト |
| 15          | 100                   | 100                   |                       |                       |                       |                      |                      |                     |
| 13          | —                     | —                     | 100                   | 100                   | 100                   |                      |                      |                     |
| 10          | 84                    | 88                    | 90                    | 93                    | 90                    |                      |                      |                     |
| 7           | 74                    | 76                    | 83                    | 89                    | —                     |                      |                      |                     |
| 5           | 65                    | 65                    | 75                    | 84                    | 70                    |                      |                      |                     |
| 2.5         | 48                    | 49                    | 65                    | 76                    | 62                    |                      | 100                  |                     |
| 1.2         | 36                    | 37                    | 54                    | 69                    | 54                    |                      | 90                   |                     |
| 0.6         | 25                    | 28                    | 43                    | 55                    | 45                    | 100                  | 80                   |                     |
| 0.3         | 17                    | 17                    | 32                    | 48                    | 32                    | 74                   | 59                   | 100                 |
| 0.15        | 12                    | 7                     | 22                    | 28                    | 22                    | 24                   | 15                   | 28                  |
| 0.074       | 7                     | 5                     | 10                    | 19                    | 9                     | 19                   | 11                   | 25                  |
| アスファルト量(%)  | 5.7                   | 5~7                   | 7                     | 7                     | 9.5                   | 12                   | 8.5                  | 25                  |
| 針入度(25°C)   | 81                    | 98                    | 93                    | 93                    | 67                    | —                    | 81                   | 81                  |
| 軟化点(°C)     | 47.3                  | 43.8                  | 47.8                  | 47.8                  | 51.0                  | —                    | 47.3                 | 47.3                |

\* 工藤の配合<sup>3)</sup>

参考文献

- 1) Factors Involved in the Design of Asphalt Pavement Surfaces, N.C.H.R.P. Report No.39, pp. 25~35.
- 2) 森吉昭博・上島 壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，第 210 号，pp. 77~84, 1973 年 2 月
- 3) 工藤忠夫：アスファルトライニング設計法に対する一考察，土木学会論文報告集，第 196 号，pp. 105~115, 1971 年 2 月。
- 4) 石井哲夫・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト合材の破断歪の四つのレベルについて，土木学会第 26 回年次学術講演会講演概要集第 V 部，pp. 337~338, 1971 年
- 5) 菅原照雄：アスファルト関係研究機器について，アスファルト，85 号，1972 年
- 6) 工藤忠夫・菅原照雄：水工用アスファルト混合物のクリープ挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第 201 号，pp. 113~122, 1972 年 5 月。
- 7) 菅原照雄：アスファルト混合物の力学的性状について，土木学会論文報告集，第 207 号，pp. 73~81, 1972 年 11 月。
- 8) 笠原 篤・森吉昭博・石井哲夫・上島 壮・菅原照雄：アスファルト合材の破壊に関する研究 一主として破断歪について一，石油学会第 13 回研究発表会講演要旨，pp. 64~67, 1970 年 10 月。
- 9) 横堀武夫：材料強度学，pp. 149~275, 技報堂。
- 10) A.G.J. Klomp and G.M. Dormon : Stress Distribution and Dynamic Testing in Relation to Road Design, Proceeding of the Second Conference of the Austra-

- lian Road Research Board, 1964, Vol. II, pp. 701~728.
- 11) Kobayashi, T. and Engene L. Skok, Jr. : Evaluation of the Flexible Pavement on the Tomei Expressway by the Fatigue Cracking Concept, Proc. of JSCE, No. 211, March, pp. 89~98, 1973.
  - 12) 名神高速道路舗装調査報告書, 高速道路調査会, 名神舗装専門委員会, 1968.
  - 13) 菅原照雄・笠原 篤 : アスファルト合材の動的応答と疲労について, 道路建設 No. 295,, pp. 43~53, 1972 年 8 月.
  - 14) 笠原 篤・菅原照雄 : アスファルト混合物の動的応答に関する研究, 土木学会論文報告集, 第215号, pp. 75~83, 1973 年 7 月.
  - 15) 神崎 靖・松浦精一・田中勤也・菅原照雄 : アスファルト舗装の Rutting に関する基礎的研究—第一報, 土木学会第 24 回年次学術講演会講演概要集, 第IV部, 1969 年 9 月.
  - 16) Hveem, F.N. : Pavement Deflections and Fatigue Failures, HRB Bull. 114, pp. 43~87, 1955.  
(1973. 5.14・受付)
-