

アスファルト混合物の力学的性状について

A MECHANICAL RESPONSE CONCEPT OF BITUMINOUS MIXTURE

菅原 照 雄*

By Teruo Sugawara

1. ま え が き

本論文は“レスポンスとしてとらえたアスファルト混合物の力学的な性状”について、著者の一連の研究ならびに既往の論文などから得られたものの考え方についての著者の試論である。ここに述べる考え方の個々のものは、特に新しいものとはいえないが、

環境条件—荷重条件—材料のレスポンス—パフォーマンス

をきわめて基礎的な考え方で一貫させ、さらにお互いにフィード・バックさせ合うことの重要性を明らかにしており、その内容は、

- a. アスファルトを用いる 構造物の力学的性質にとって重要と考えられる諸性質（道路舗装ならびにそれら以外の用途をも含めて）
- b. 材料としてのアスファルト混合物の特性
- c. アスファルト混合物の力学的なレスポンス
- d. 弾性学的層構造解析の材料研究への寄与
- e. 材料研究における入力条件の整理
- f. 実際に用いられる研究の手法
- g. 著者の用いる研究手法

などである。研究手法についてかなりのスペースを与えているのは、アスファルト混合物のレスポンスを正確に把握するためには、研究目的に完全に合致した手法を定め、さらに研究機器を設計、製作し、かつ運転することが主要な研究テーマの一つであるという考え方に基づいている。

ここに述べようとする多くの事項についての個々の研究成果の多くは発表済みまたは整理中であり、ここでは述べない。

著者は道路以外へのアスファルト混合物の利用についての研究を通じ、アスファルト混合物なるものについて

の体系的な研究成果がきわめて少ないことを知り、本論文をとりまとめてみた。各位のご叱正、ご批判が戴ければ幸である。

2. 力学的に重要と思われる性質

主として実用面から考え、アスファルト混合物において検討されるべき力学的な性質は次の4つとなろう。すなわち、

- (1) 混合物の破壊特性、強度
- (2) 層として構成されたアスファルト混合物の荷重分散性能
- (3) 変形特性
- (4) 力学的な性状の経年変化（主として疲労性状）である。

(1) アスファルト混合物の破壊特性ならびに強度

あらゆる材料において、力学的性質を論ずる際、まず破壊特性（破壊のモードなど）ならびに強度が論じられる。これはアスファルト混合物においても同様に重要な問題であろう。アスファルト混合物が、土木用の諸材料とことなる挙動を示しているとするれば、それは多くの場合かなりの流動を伴う破壊を示し、ごく小さな温度の変化、ひずみ速度の変化で、その破壊のモードが極端に異なり、破断のひずみ量が変化し、また強度（むしろ抵抗と呼ぶべきかも知れない）が変化するなどをあげることができよう。混合物の破壊特性に関する研究例は予想外に少なく、本格的なものとしては、著者らのもの^{1),2)}、Eriksson³⁾、Shell Group⁴⁾、Monismith⁵⁾らのものが数えられるのみである。しかし最近舗装のRationalな設計、パフォーマンス評価の面からきわめて重視される研究領域となってきている。

(2) アスファルト混合物の荷重分散性能

アスファルト混合物のもつ荷重分散性能 (Load Spreading Property) がきわめて重要な性質であることは古くから指摘されている。英国道路研究所は、1950年代の末に大規模なフルスケールテストと弾性解法に基づく理論計算の結果とから、高安定度混合物層が、すぐれた荷重分散性能をもつことを明らかにした⁹⁾。これはかなりの年月を経て A. A. S. H. O. の Road Test により確認されていることは周知のとおりである。

弾性理論に基づく層構造解析の結果は、上下層の弾性係数比なるものを介して、弾性係数が荷重を分散させる能力すなわち路面における応力の軽減と密接に関係していることを示している。しかしこれはアスファルト舗装のもつ複雑な性状からして、簡単に断定し、また簡単に説明し得るものではなく、理解が困難であり、さらに混合物のもつ疲労特性の複雑さが加わっている。著者はこの混合物の荷重分散性能に関し、“載荷時間 (走行速度など)、温度、舗装構造の強弱、疲労特性などの関数としてのスティフネス”と定義すべきであろうと考えている。ここで著者のいうスティフネスとは、弾性係数などと呼ばれるような物質定数としてではなく温度、時間の関数としての応力とひずみの比を指している。

(3) 変形特性

従来“安定度”などの名で呼ばれてきた“プラスチック・フローに対する抵抗性”などはここでいう変形特性の一つである。これは特に常温以上の領域で問題とされ道路ではワダチ掘れ、平坦性を支配し、ダムライニング工などでは自重に基づく“ずれ”などを支配している。

これらは既往のアスファルト舗装の研究の主テーマの一つであり、ここにあらためて論ずるには及ぶまい。しかし、力学的なレスポンスとして、変形ならびにその複元を論ずる場合、さらに明らかにしていくべき事項もまた多いことを指摘せねばなるまい。

(4) 力学的な性質の経年変化

経年変化を論ずるにあたって重要なことは、

- a. 混合物を構成する材料の変質、たとえば骨材の風化、アスファルトの老化など
- b. 骨材の形状の変化、骨材とアスファルトとの接着状態の変化、空隙の変化など、主として力学的な要因に基づく性状の変化

の二つに帰せられよう。a. は材料の老化の名で呼ばれ結果的には力学的な性質の変化がもたらされている。b. は力学的な条件に基づく材料の疲労をも含めて考えるべき問題であり、これも当然力学的な性質の変化をもたらしている。

この分野の研究の大半は、化学的な現象を、定性的に

研究しているのみで、力学的な特性についての定量的な性状把握はあまり行なわれていない。この分野の研究の重要性はあらためて指摘する必要もないであろう。

3. 材料としてのアスファルト混合物の特性

(1) 概 説

一般にアスファルト、アスファルト混合物は、他の土木用諸材料に比して、著しく複雑な性状をもつとされている。それが複雑とされる理由を整理してみると、

(1) 他材料とことなり、まだ明らかにされていない組成をもつ有機質の材料であり、それが骨材なる無機物と、きわめて弱いむすびつきをしてあるに過ぎないであること、したがって経年変化も大きいこと

(2) 混合物を構成する原材料、アスファルトおよびその混合物の製造法、施工法により、材質がきわめて幅広く分散すること

(3) 力学的性状は時間、温度への依存度が大きく、その性状を正しく把握することが困難なこと

などに帰せられよう。

アスファルト混合物を構成して重要な地位を占めるアスファルトセメントなるものが、原油、製造法などにより、きわめて異なった性状を示していることは事実である。またそれをを用いて作った混合物がさらに異なった性状を示すことも事実である。ここでわれわれが問題として検討すべきことは、その性状の分散が、規則性をもっているか否かである。著者は数多くの実験結果から、“すべてを統一解釈できるほどの規則性を見出すことはできないが、そのかなりの部分について規則性を見出し、かつ理論的な解析ができる材料である”との結論に達した。

したがって著者は、アスファルト混合物において通常いわれているごとく、“材質が極端に変化するので、一般的特性がつかみにくい”という立場には立ちにくい。これらの見解が示す問題点の多くは、その性状をいかに把握するかという研究手法に存在するのではないかと思われる。

アスファルトならびに混合物の載荷時間、ひずみ速度ならびに温度への依存性はきわめて複雑なものであることは明らかであるがそのかなりの部分に規則性が見出されるとするならば、この研究分野に最近発展の著しい粘弾性学における、いくつかの研究手法の導入が可能であり、比較的容易にある体系にくみあげることができるはずである。これについて、過去の研究例ならびに著者の一連の研究によれば、アスファルトセメントは、熱レオロジー的に単純な物質であるとしても大きな誤りでは

なさそうであり⁷⁾、またアスファルト混合物もかなりこれに近い性状を持つ材料とみなしうるようである⁸⁾。したがって従来これらの材料は非常に複雑な性質をもち、その特性がつかみにくいとされてきた主な理由は、

i) 理論的なよりどころをもつ、体系的な研究が行なわれていなかったこと

ii) 研究手法に欠陥のあったこと

に帰せられよう。i) に対しては、さきに述べたレオロジー手法が参考となろうし、また ii) については、最近の発達した周辺技術を活用することにより、手法、機器を十分に利用できる。

アスファルト混合物の性状を支配するアスファルトが複雑な有機物であることに基づくいろいろな困難さは、現在の段階でこれを十分説明しつくすほど解明されてはいないのみならず、近い将来においてそれが解明される見とおしは全くないといった方がよいであろう。しかし化学的な特性がよく知られていないことが、ただちにその材料の他の性状がわからないことを意味するものではない。現在の段階において力学的特性を把握するための手法は高度に発展しており、それらが化学的特性を知るための有力な手段ともなることを考え、化学的特性と力学的特性に関する研究が併行して進められて行くべきであろう。

きわめて重要なことの一つに、アスファルトセメントの力学的な諸性状を示すに必要なパラメーターを見出すことがあげられる。これは当然、感温性の指数、ひずみ速度依存性を示す指数のいずれかから選ばれるはずである。アスファルトのような物質に、レオロジー手法を適用するならば、感温性を示す指数と、ひずみ速度依存性を示す指数は一致する可能性が高い。これに対して Van der Poel⁹⁾ らは針入度指数 (Penetration Index) なるものを与えた。この針入度指数の算定には“軟化点における針入度は 800 である”とする仮定が含まれており、古くから議論の対象とされている。著者の研究の結果も軟化点における針入度は 500~1000 に分布しており、問題とされるのは当然である。しかし針入度、軟化点とも高精度をうるのがむずかしい試験法であることを考えるとき、軟化点における針入度の仮定はおおむね妥当として許されるべきではないと思われる。著者らはアスファルトセメントのようなものに対しては、2つの温度における粘度比すなわち粘度指数¹⁰⁾を、混合物の性質など、いわゆる工学的な特性を論ずるには針入度指数を用いてはどうかと考えている。これらが事実混合物の性状を論ずるのに有用なパラメーターであり得ることは、著者の多くの研究から確かめられている。アスファルトの性状分布の幅広さも、この種のパラメーターの採用により大幅に簡略化して表現され、また議論も容易になる

ものと考えられる。

(2) アスファルト混合物の型 (タイプ)

アスファルト混合物は経験的材料と呼ばれる分類に属し、学問的にこれを分類することはむずかしい。また世界の各国がそれぞれかなり異なったタイプのものを用いているので、それらを網羅した型分類が行なわれた例はあまり見当たらない。著者はさきに R.R.L. の分類⁹⁾に基づき、強度、変形抵抗が、混合物のいかなる性質に依存するかという観点から次のような分類を試みた¹¹⁾。

この方法によれば、アスファルト混合物は、大きく3つに大別できる。すなわち、

- i) 無空隙型アスファルト混合物
- ii) 普通加熱混合型アスファルト混合物
- iii) マカダム型アスファルト混合物

i) は骨材の空隙を完全にアスファルトで飽和させたものであり、荷重に対して主としてアスファルトの粘性で抵抗するもので、アスファルト混合物のうちでもっともレオロジー理論に適合し、マッシュまたはグースアスファルトなどの名で呼ばれている。無空隙とはいっても通常 1~2% の連行空気を含むが、この空隙は、ii)、iii) と異なり、その力学的性状をあまり大きく支配するものではないとされる。3軸圧縮試験によるならば、概念的に $\tau \geq c$ なる関係で表現され、内部摩擦角の安定度への寄与は、きわめて小さいかまたはないことが明らかにされている。

ii) は骨材空隙がアスファルトで飽和されていないものであり、通常数パーセントの空隙率のものが用いられている。安定度は主として骨材のかみ合せに依存し、またアスファルトの粘性にも依存する。この依存の程度は混合物の種類によってかなり幅広く変化する。アスファルトコンクリートの名で呼ばれるものは、骨材のかみ合せへの依存度が高く、またロードアスファルトの名で呼ばれるものは、コヒージョンへの依存度が高いとされている。これは、概念的に $\tau \geq c + \sigma \tan \phi$ で表現される⁹⁾。

iii) の混合物では安定度は、ほとんどすべて骨材のかみ合せに依存し、アスファルトは、骨材相互をごくかんたんに結びつけ、骨材の飛ばされるのを防ぐ程度の役割しか果たさない。実際にはコヒージョンが0ではなく、小さいに止まるとい程度と考えてよからう。同様に、 $\tau \geq \sigma \tan \phi$ でおおよそ表現できよう。

以上の混合物の型分類によれば、安定度が何に依存するかによって、混合物の特性は大きく異なるはずでありまた特性把握の手法もまた異なるのは当然であろう。本論文では主としてもっとも実用的な ii) の型の混合物について論を進めよう。

4. アスファルト混合物の力学的なレスポンス

(1) 概 説

前述の時間(ひずみ速度)、温度への依存度が高いことは材料特性を論ずるうえからきわめて重要である。これはすなわち、この種材料は、たとえば鋼の弾性係数に類する物質定数をもたないことを示している。われわれが通常用いている材料では“材料は……なる性質をもっている”という言葉が利用できるのに対し、アスファルト混合物の力学的性質については、“……なる条件に対し、……なる性質を示す”という言葉で表現されなければならない。すなわち“……なる性質をもつ”というより、“……なる反応(レスポンス)を示す”というのが合理的である。

これから、環境条件、荷重条件の解析、試験に際していかなる条件を与えるかがきわめて重要なものであることが指摘される。このレスポンスとしての表現はほぼ世界的なコンセンサスとして多くの論文において用いられている。

(2) レスポンスに関係する諸因子

構造の力学と材料性状を結びつけて考えるとすれば、それは、

環境条件—荷重条件—(構造特性)—材料反応
として表現できる。

実用的な面まで考えるならばこれにパフォーマンスの解析までをつけ加える必要がある。

(3) 環境条件

アスファルト混合物が利用される場所、構造物の種類などに基づく環境条件の解析が重要である。アスファルト混合物が利用される構造物の対象は

- i) 各種のタイプの道路舗装
- ii) 空港施設としての舗装
- iii) 各種水利構造物におけるライニングなど
- iv) 防水、止水用材料としての利用

などがあげられよう。荷重条件は別として、これらのものについての環境条件はかなり異なっているに相違ない。このうち大きなものとして、温度、水などの条件があげられる。またこれらのアスファルト混合物は、それ自身で荷重に抵抗することはほとんどできないのみならず、自重をも支えることが困難である。したがって、かならず何らかによって(多くの場合地盤)による支持を得て、各種の外力に抵抗し、また荷重伝達の役を果たす。したがってこの支持条件もまた重要な条件となっている。

(4) 荷重条件

舗装に類するものにおいて荷重条件はきわめて複雑であり、他の構造物では対象とならないようなものを多く含んでいる。これを利用対象ごとに整理してみると次のようになる。

(i) 道路舗装

走行車両の有無、走行速度、交通車両の構造、軌跡分布、発進停止の条件、舗装構造

(ii) 空港舗装

走行の有無、空港中での位置、航空機の構造、舗装の構造

(iii) 水利利用構造物の舗装

基盤の変形、水圧およびその変動の状態、自重などまたすべてに共通して温度応力も無視できない。

道路舗装における荷重、交通量、軌跡分布などは材料の疲労に対して大きな関係を持ち、反面交通をもたない舗装は、アスファルト舗装にとって不可欠とされるところの供用開始後の圧密作用が期待できず、全く異なった性格をもつとみなさなければならぬ。車輪の軌跡分布は材料の疲労、ワダチ掘れに関係し、停止荷重はクリープに基づく変形を支配する。また発進停止などの作用は舗装に対して水平方向の荷重として作用する。走行速度は載荷時間、ひずみ速度に直接関係する。舗装構造の強弱はたわみ量を支配し、間接的にひずみ速度を支配する。この意味から構造強さなども荷重条件における支配的因子の一つとなる。滑走路などの特徴は、輪荷重、タイヤ圧が、きわめて大なことであり、走行速度もまた大である。航空機の揚力、航空機の振動もまた考えるべき要因の一つである。これらは舗装体に道路とは異なった応力、ひずみ、ひずみ速度などをもたらしている。また、荷重頻度が小さいにもかかわらず、軌跡集中の程度は道路にくらべはるかに大とされている。

水利構造物の荷重条件^{12), 13)}は、前二者とまた異なっている。供用開始後の荷重は、自重と水圧が主たるものである。水圧はタイヤ圧などとはかなり性格を異にし、小半径で、大きなたわみをもたらす自動車輪荷重に比し、水圧は均一ないしゆるい変化でかかることから、その Deflection Basin の形状は全く異なっているとしなければならない。一方水位変動などはひずみ速度を支配している。多くの場合斜面に舗装されているので、自重による“ずれ”すなわちクリープ性状が大きな問題としてとりあげられることが多い。基盤(堤体)変形は舗装体の自重による変形をもたらす、場合によっては、舗装体が基盤変形にひきずられる現象も多い。

5. 材料研究における層構造解析の地位

弾性学的手法を用いた層構造解析,ならびにそれに基づく舗装設計法に関する研究が活発に行なわれている^{14)~16)}。それらの手法にはいくつかの大きな仮定がおかれていることなどからその有用性についての議論もまた多い。著者は材料の合理的な評価のための一手段としてこれらの研究も行なっており¹⁷⁾,それが近似的な応力,ひずみを計算値として与えることから,材料性状の研究にとって有用な手段となるものと考えている。計算値から得られる応力レベル,ひずみレベル,さらにそれに走行速度を加味することにより,材料の実験研究に用いるべき,応力,ひずみ,ひずみ速度が与えられる。これらにさらに温度条件をも加えて,各種の試算,くり返し計算を行なうことにより,相互に材料性状は層構造解析へ,層構造解析の計算値は,材料研究側への重要な入力として与えられるであろう。著者らが材料研究に用いている応力レベル,ひずみレベル,ひずみ速度などはすべてこれらの解析の結果を参考とし,さらにそれらの幅を若干拡大して実測を行なうことを基本的な方針としている。

目下の段階において弾性解法における問題は,どのように実際に近い弾性係数を仮定したにせよ,変形に至る過程を説明できても,その変形の復元,残留ひずみなどを論ずることがきわめて困難なことにある。また疲労性状などをも考慮に入れていくこともまことに困難である。かりに弾性解法のかわりに粘弾性解法を用いるとすれば上に述べたいくつかの点は解消できるが材料についての詳細な研究なしにはこれらが設計にまで発展して行くのは困難である。

6. 各種の条件の整理

用いられる構造物の種類により,環境条件,荷重条件などが広く変化することはさきに述べた。アスファルト混合物について広範な研究を行なおうとするならば,これらの変化に富んだ条件を,より単純なものに組み立てなおす必要がある。この整理はきわめて常識的に,応力,ひずみ,載荷時間,ひずみ速度,温度の5項目について行なわれる必要がある。

(1) 応力

応力は荷重条件,温度などの条件から求められる。道路舗装を例にとるならば,輪荷重,タイヤ圧などと,仮定した弾性係数,構造の構成から舗装体内の応力が近似的に求められる。

応力は破壊時の応力と,実際に舗装に生ずると予想される応力,疲労破壊にとって考慮されるべき応力(實際上この3つの間にはかなりの差がみられる)の3つで考える必要がある。破壊時の応力は破壊強さではあるが,

アスファルト混合物の強さの数値自身もレスポンスとして示されるべきもので,一定のものではなく,単に強度として表現するのは適切ではなからう。

アスファルト混合物の破壊は,

- 通常材料にみられるようないわゆる強さで表現されるような破壊
 - くり返し荷重によって生ずる疲労破壊^{18),19)}
 - 応力の大小にほぼ無関係に,あるひずみ量に達したときに生ずるクリープ破壊
- の3つに分類できる。小さな応力レベルをも無視できないのは主としてc.の理由に基づいている。

(2) ひずみとひずみ速度

各種の構造物におけるひずみも,おおよそ計算が可能である。アスファルト混合物においてひずみに関係した重要な事項として次の3つがあげられる。

- 変形の過程における応力-ひずみ関係
- 回復するひずみ,残留ひずみ
- 破断ひずみ

a. は弾性係数の仮定さえ正しければ,弾性的な解法によって,各種の構造物についておおよそ計算できるが,これはきわめて複雑な作業になることは避けられない。また,残留ひずみを計算によって求めることも困難である。したがってこれについては主として材料側から実験的手法によってアプローチされている。レオロジー材料として,3または4要素模型について解析し,弾性項,粘性項を分離しようとする試みも古くから行なわれており,これらを粘弾性解法に利用しようとする試みも行なわれてきている。

破断のひずみは,破壊のモードごとに,固有のものに近いのではないかと考えられる。この根拠として,破壊のモードによって破断ひずみレベルは展性,延性破壊,脆性破壊,疲労破壊についてそれぞれ 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} ならびに 10^{-4} なるひずみのレベルにあることが著者によって確認されている²⁰⁾。

以上はひずみの絶対量を問題としているのに対し,あるひずみに達するに要する時間,すなわちひずみ速度は粘弾性的にきわめて重要である。レスポンスのひずみ速度依存性が大きく,多くの研究においてひずみ速度がパラメーターにとられている。あらゆるデータはひずみ速度を考慮することなしには意味をもたないとする考え方が支配的になってきているとみてもよいであろう。

ひずみ速度は荷重条件と同時に構造の強弱によっても変化することはさきに述べた。一般的に車両の走行速度が大になるほど,また構造の弱いほどひずみ速度は大になる。

ひずみ速度と同様の概念から載荷継続時間もまた,レ

スポンスを支配している。これは簡単にクリープ性状から理解される。

(3) 温度

温度は通常われわれの経験する温度範囲であり、施工性などをも対象に含めるならばさらにこの幅は拡大される。パフォーマンスからすれば、これに対応するアスファルトセメントの粘度は 10^3 ポアズから $10^{13} \sim 10^{14}$ ポアズの中に分布している。施工性の見地からは $10^3 \sim 10^2$ ポアズのオーダーまで加えられる。

7. 実際に用いられる研究手法

(1) 概論

実用的な工学的手法、シミュレーション手法は、それぞれの領域においてきわめて有用な手段であることは疑う余地はない。しかし本論文において討議されるようなことについては、さらに合理的、解析的な研究手法が要求されるのも当然である。

さきに述べたとおりアスファルト混合物なるもののパフォーマンスを考えると、i) 破壊、強度特性、ii) 荷重分散性能、iii) 変形特性、iv) 疲労特性の4つについてこれまでに述べた各種の事項を適用して考察を加える必要がある。

(2) 破壊特性、強度特性

これらについては他の材料に用いられるものと全く同じ方法が適用できる。研究の要点をレスポンスとすれば温度、ひずみ速度は、実用条件にマッチさせる必要がある。単に破壊を知るのみでなく、破壊のモードをも知るためには、破壊に至る応力-ひずみ曲線の形状も追跡する必要がある。これらのために、圧縮、引張り、曲げ、3軸圧縮などの方法を利用することができる。しかし、温度、ひずみ速度などを実用条件にシミュレートさせるためにはかなり大規模な設備を必要とすることもやむを得ない。

(3) 荷重分散性能

さきにアスファルト混合物の層としての荷重分散性能は最終的にはスティフネス（物質定数としてではない弾性係数、変形係数）に帰せられることを説明した。この考え方自身は、理論的な裏付けをもち、広く認められている。粘弾性体における変形係数について、シェルグループは、スティフネスなる考え方を出し、多くの場合、破壊時の応力とひずみの比としてスティフネスを求めている。これは当然温度、時間などの関数として示され

る。これらの研究は、一貫した考え方として、材料性状から舗装設計までに応用され、高い評価が与えられている。

これらの研究に対するものとして、粘弾性学の分野で緩和弾性率 (Relaxation Modulus)、複素弾性率 (Complex Modulus) が主たる手法として用いられている。いうまでもなく、これら3つはかなりの領域で一致しているとしてもよい。後2者は、スティフネス理論に比し、学問的にさらに普遍性をもつものと考えてもよいであろう。緩和弾性率は広い意味での応力緩和性状の一つの表現の方法でもある。

(4) 変形特性

変形特性は、基本的には前二節中にかかなり含まれてしまいが、特に研究の対象となるのは、

- i) 垂直荷重（死・活荷重）に基づく変形
- ii) 水平方向のせん断力に基づく変形
- iii) 勾配部の舗装における自重に基づく変形

などであり、応力緩和、クリープ（ひずみ緩和）などの手法、すなわち流動特性を求めめるための手法が利用される。その特性から主として常温以上において検討されることが多い。

(5) 疲労特性

アスファルト舗装の疲労問題は、最近きわめて活発に研究が開始された分野である。しかし疲労現象自体が複雑な現象を含み、まだ完成された研究例は見当たらない。

研究手法の決定に際しては実際現象として見出される次の3点が重要な示唆を与えるであろう。すなわち、

- i) 疲労により破壊強度は低下し、
- ii) 破断に至るひずみ量は低下し、さらに
- iii) 緩和弾性率もまた低下する。

従来の研究結果によれば疲労の影響は予想外に大きいことは明らかであるが、夏季高温時にかかなり回復することもまた明らかであり、統一して説明しつくすにはなお時間を必要とする。このためにはきわめて単純な現象に分類しておのおのについて詳細な検討が必要であろう。それらの重ね合せもまた課題の一つとなる。

(6) アスファルト混合物における時間、温度換算法則²¹⁾

土木技術者の用いる力学には時間温度などの要因は含ませにくい。また時間と温度との間には一見何らの関係をもたないかに見える。しかし熱レオロジー的に単純な材料については、温度、時間の換算が可能であり、これを称して換算変数法という。これについては諸外国の研究例、また著者らの共振法、緩和弾性率の測定をはじめ

とする多くの実験方式への適用の可否に関する研究例があり、ある範囲内においてアスファルトセメントにおいてはもちろんアスファルト混合物についてもほぼ適用できることが明らかにされつつある。ここで、ある範囲とは主として、ひずみのレベルによってきまる範囲を指している。

材料の粘弾性についていろいろな量を測定しようとする際、観測時間をある程度以上に拡大し、また温度範囲を拡大することができないか、またはできるとしても、それにとまって実験精度が落ちかつ純粋な量の測定ができない場合が多い。これらに対して観測時間の拡大を温度を変化させる手段で、またその逆の手段で、同じ値を得ることができる。すなわち高温での観測がよりながい時間での粘弾性挙動に、低温での観測がより短い時間での挙動に対応することが経験的に知られている。このように経験法則をもとにして、粘弾性状を温度、時間の2つの変数の関数として表現したとき、異なった温度、異なった時間での観測値を、基準に選んだ一つの温度に対する測定に形にして、1つの合成曲線 (Master Curve) にまとめることができる。この曲線を描くとき異なった温度での測定に対応する曲線を時間軸に平行移動 (Shift) させて重ね合わせを行なうので、このシフトを示す量 a_T をシフトファクターと呼ぶ。

著者らは緩和弾性率にこの手法を適用して、 10^{-5} 秒～ 10^5 秒なる広い領域について緩和弾性率を求めることができた²³⁾。

従来アスファルト混合物の実験研究において、これらの法則があまり利用されなかった最大の理由は、合材の実験研究における精度上の問題にあったとしてもよからう。この意味において、この種材料における試験値のばらつきなどを統計的手法を用いることにより詳細に検討して行くことが課題となるであろう。著者らの経験によれば、破壊はいうまでもなく複雑な現象であり、ばらつきのあることは当然としても、破壊以前の過程においては予想外に精度のよい実験値が得られることが多い。

8. 著者の用いる実験研究手法について²²⁾

以上の討議に基づくならば、道路ないしは他の構造について、その力学的な状態を十分に吟味し、それらを試験条件として与え、レスポンスを見出すには、合理的な研究手法を開発すること自体がきわめて重要な研究のテーマとなってくる。著者らはこれらについていくつかの研究手法を新しく開発し、また周辺学問領域から導入した。また諸外国で用いられて来たものに改良を加えたものも多い。以下に、簡単に主な手法について紹介しておく。

(1) 破壊特性、強度特性

著者らの用いて来た手法の主なもの、棒の単純曲げ²³⁾であり、これと併行して、引張り、圧縮などの方法をも併用している。棒の曲げを採用した理由は、実際の舗装に生じているきれつは多くの場合曲げ作用によって、常温以下ではやいひずみ速度で生じていること、きわめて均一なよい供試体が得られやすいこと、結果の解析が容易なことなどによる。著者らの経験によれば、圧縮、引張り、曲げによって示される性状の間には密接な関係が存在するらしくみえる。ひずみを与えるための装置としては、

- i) 高速曲げ装置 (2.5×2.5×25 cm 供試体, スパン 20 cm において、棒下縁のひずみ速度 10^{-4} ～ 10^{-1} , 1/sec)
- ii) インストロン型試験機 (同上 3×10^{-5} ～ 3×10^{-2} , 1/sec)
- iii) オルゼン型試験機 (同上 $\sim 3.4 \times 10^{-3}$ 1/sec)

の3機種を用いている。これは実用面のひずみ速度をほとんど完全に網羅している。供試体の温度調節はいずれのものでも -30°C ～ 30°C が可能である。これらの機器によって見出されたものの主なものは

a. 破壊のモード

ひずみ速度、温度、アスファルトセメントの物性などの関数として示される混合物の脆性破壊、延性破壊の領域の分離、それぞれの領域の特性

b. 破壊強さ

ピークをもつ山形の曲線としての温度—強さ関係、およびそのピークの移動

c. 破断のひずみ

ゆるいSカーブをもつ、破断ひずみ—温度関係、4つレベルで示される破断ひずみ

(2) 応力緩和特性

著者らの応力緩和性状へのアプローチは、

- i) 温度応力ならびにその緩和
- ii) 載荷時のレスポンス
- iii) 流動特性

の3つの角度から行なわれてきた。ここではこれらに用いられる多くの手法のなかから次の2つを選んでみる。すなわち、

- a. 試料に一定のひずみを与え、応力の減少を時間の関数として求める方法²⁴⁾ (もっとも一般的な応力緩和試験)
- b. 一定ひずみ速度でひずみを与え、応力—ひずみ曲線を解析することにより緩和弾性率を求める方法 (主として曲げによる)²⁵⁾

a. はきわめてゆっくりと生じている緩和現象を知るのが有効であり、温度変化に対応するもの、静止荷重に対応するもの説明に有用である。b. ははやい変形過程における緩和現象の説明に便である。

a., b. の双方について、前項に述べた試験機がいずれも利用できる。

ごく短時間の領域すなわち $9 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-4}$ 秒の領域については、複合板ならびに棒の共振²⁶⁾によりスティフネスを求める方法を採用した。この方法は、スティフネスの上限値に近い、すなわち 10^5 kg/cm^2 前後のスティフネスを求めるのに有効な非破壊試験である。しかしその性質上、高温での試験が困難であることはやむを得ない。共振法による載荷時間と、前述の緩和弾性率を求める b. 法とのギャップを補う意味で、強制振動法を用いる動的載荷装置を開発した²⁷⁾。本装置は各種の波形をもって 0.1~20 Hz の強制振動を 2, 3 の寸法の棒状供試体に与えることができる。

(3) 変形抵抗ならびにその復元

著者らは、変形抵抗、復元、残留ひずみに関する研究として次にあげる方法を用いている。すなわち、

- i) 平行平板にはさまれた混合物のずれのクリープ測定（ずれの粘弾性）²⁸⁾
- ii) 8. (1) に述べた棒の曲げ、圧縮、引張りなど
- iii) 上の 3 つによるクリープの測定
- iv) ホイールトラックキングによるくり返し荷重に基づく残留変形の測定²⁹⁾
- v) 設定された 2 つの応力レベルの往復、2 つのひずみレベルの往復に基づく、ひずみ、応力の測定などである。従来工学的な方法として混合物の配合設計、品質管理に用いられてきたマーシャル法も参考として用いられている。

i) は平行平板法として古くから利用されているものである。また ii), iii) も新しい手法ではないが、それらが解析にたえることから興味ある方法である。iv) はこれらのなかで若干性格を異にした、シミュレーション方式である。しかし実験結果からかなり解析にたえるものであることが確認されつつある。v) はインストロン型試験機によって比較的容易に求めることができる。

(4) 疲労性状

前述した動的載荷装置は、0.1~20 Hz の強制振動を与える方式で、サイン波、三角波、矩形波、ノコギリ波ならびにピンポット方式によるランダム波を得ることができ、混合物の動的なレスポンスを得るのみではなく、同時にそのくり返しすなわち疲労をも測定でき、応力ひずみのフィードバック機構を含む。著者らは疲労を

単なる破壊に至る載荷回数としてとらえるばかりでなく、破壊に至る過程の応力-ひずみ-スティフネス変化としてとらえるべく計画した。疲労性状について特に配合、使用アスファルトの粘度、ひずみ、応力のレベルなどについて検討中である。

9. その他の性状

以上述べてきたものは主として構造のパフォーマンスに関連した分野であるが、このほか施工性に関連した領域の力学的性状も実用上きわめて大事である。その主なものは、

- a. 材料の混合時における力学的な性状
 - b. 合材の敷均し、転圧時の力学性状
- の 2 つに帰せられよう。この 2 つは単に材料力学的な因子以外に多くのものを含み、単なる力学で片付けることは困難である。しかしこれらの多くは材料のせん断強さなどからアプローチされるべきであろう。

10. ま と め

本論文はアスファルト混合物に関する著者らの研究成果と、既往の研究をもととし、混合物の性状を支配する諸種の条件を吟味し、それらの条件へのレスポンスとして示される材料の性状について述べた。個々のデータについては参考文献をご参照戴ければ幸である。なお若干の未発表分については近い将来これを明らかにしたいと考えている。

本研究に際し、道路舗装関係者はもちろん、間接的ながら、空港、ダムなどの技術者、特殊アスファルトの研究者諸氏に、きわめて示唆にとむご意見を戴いた。これは、ここに述べる考え方を組みたてるため非常に有益であった。また著者の所属する北海道大学工学部交通材料科学研究室の諸君、特に中島助教、森吉講師、上島壮、笠原篤の諸君に有益なる討議、援助を戴いた。ここに各位に厚い敬意を表するものである。

なお本研究のかなりの部分に文部省科学研究費を利用して戴いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 森吉昭博・上島 壮・菅原照雄：アスファルト舗装材料のレオロジー、石油と石油化学、Vol. 13, No. 4, pp. 80, 1969.
- 2) Sugawara, T. : Brittleness and Visco-Elasticity of Bituminous Mixtures, [Annual Report of Roads, 1970. pp. 61, 日本道路協会.
- 3) Eriksson, R. : Deformation and Strength of Asphalts at Slow and Rapid Loadings, Statens Vaginstitut, Modellance 82, Stockholm, 1951.
- 4) Heukelom, W., Klomp, A. J. G. : Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and

- After Construction, Proc. of Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, pp. 667, 1962.
- 5) Monismith, C.L., Alexander, R. L. and Secor, K. E. : Rheologic Behavior of Asphalt Concrete, Proc. Assn. Asphalt Paving Tech., Vol. 35, pp. 400, 1966.
 - 6) Road Research Laboratory 編 : Bituminous Materials in Road Construction, pp. 218, H.M.S.O., London.
 - 7) 間山正一・北郷新平 : アスファルトの粘度に関する基礎的研究, 道路, 1971年9月号.
 - 8) Monismith, C.L. : Fatigue of Asphalt Paving Mixtures, Proc. First Annual Street and Highway Conf., Univ. of Nevada, 1966.
 - 9) Van der Poel, C. : "Road Asphalt" in "Building Materials, Their Elasticity and Inelasticity" M. Reiner 編 : Interscience, 1954. その他.
 - 10) 笠原篤・菅原照雄 : アスファルトの性状とアスファルト合材の力学性状の関係について, 石油学会誌 Vol. 15, No. 11, 1972年11月
 - 11) 前出, 文献 1).
 - 12) 工藤忠夫 : アスファルト ライニング設計法に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 196, 1971-12.
 - 13) 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, 土木学会論文報告集, No. 201, 1972-5.
 - 14) Peattie, K. R. : A Fundamental Approach to the Design of Flexible Pavements, Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalts Pavements, Univ. of Michigan, pp. 403, 1962.
 - 15) 前出 4).
 - 16) Dormon, G. M. : The Extension of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements, Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 785, Univ. of Michigan, 1962.
 - 17) 菅原照雄 : 舗装の構造の力学と材料物性, 道路建設, 45年10月号.
菅原照雄 : 舗装構造の Rational Design と材料物性, 第10回日本道路会議論文集, 1971.
 - 18) Pell, P. S. : Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes, Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, pp. 310, 1962.
 - 19) Nijboer, L. W. : Mechanical Properties of Asphalt Materials and Structural Design of Asphalt Roads, Highway Research Board, Proc. Vol. 33, pp. 185, 1954.
 - 20) 菅原照雄ほか : アスファルト合材の破断ひずみの4つのレベルについて, 第26回土木学会年次学術講演会にて講演.
菅原照雄ほか : アスファルト合材の破壊に関する研究一主として破断ひずみについて, 石油学会第13回研究発表会にて講演.
 - 21) レオロジーに関する各種の書籍で説明されている.
 - 22) 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, Vol. 15, No. 85, 1972年6月.
 - 23) 前出 1) および 2).
 - 24) 森吉昭博ほか : アスファルト合材の応力緩和に関する研究 (第2報) 一主として長時間領域において, 第26回土木学会年次学術講演会にて発表.
 - 25) 上島 壮ほか : アスファルト合材の緩和弾性率に関する研究, 第26回土木学会年次学術講演会にて発表.
 - 26) 笠原篤ほか : 動的測定法によるスティフネスに関する研究, 第26回土木学会年次学術講演会にて発表.
 - 27) 笠原 篤・菅原照雄 : アスファルト合材の動的応答に関する研究, 土木学会北海道支部研究発表論文集, 第27号 47年2月.
 - 28) Nakajima, A., Sugawara, T. : Fundamental Researches on Rheological Properties of Mastic Asphalt, Bul. of Japan Petroleum Institute, Vol. 9, pp. 84, 1967.
 - 29) 菅原照雄ほか : アスファルト舗装の Rutting に関する基礎的研究, 第24, 25 土木学会年次学術講演会にて発表.
菅原照雄ほか : 舗装の変形に関する基礎的研究, 第9回日本道路会議論文集, 44年10月.

(1972.3.15・受付)