研究展望

アスファルト混合物の物性

MECHANICAL PROPERTIES OF BITUMINOUS MIXTURE

菅原 照雄*

By Teruo SUGAWARA

1. 概 説

アスファルトは非常に複雑な化学的、物理的性状をもつ有機質材料である。したがって、それらと骨材との混合（複合）によって得られる舗装用アスファルト混合物（以下単に混合物という）もまた、きわめて複雑な性状をもつ。加えて、地域によって異なる気象、変化に富む荷重なども問題を複雑にしている。アスファルト舗装の出現はそもそもが自然発生的なものといわれるが、複雑な粘弾性的な特性を実にたくみに利用したもので、あらゆる土木構造物を通じ、まことにユニークな存在とすることができるといえる。

混合物の研究の歴史は、常にアスファルト舗装の研究の歴史そのもので、荷重と自然への挑戦と苦闘の歴史でもあった。

本稿では、このような歴史のなかで、アスファルト材料の物性研究がどのような道をたどり、また将来どこへ向かおうとしているかについていささか展望を試みる。

表—1 は、舗装構造と材料の技術の進展を大まかに5つの時代に分類してみたものである。CBR 設計法出現以前を第Ⅰ期、プレ CBR 時代として一括した。第Ⅱ期は第2次世界大戦終了時までである。このころマーシャル試験法が生まれている。この頃から1961年までが第Ⅲ期でこれをマーシャル時代と呼んでみた。AASHO 道路試験は1958年に始まり、1961年に成果が公表され⁸⁾、1962年には新設計法が提案された⁹⁾。したがってここに線を引き、オイルショックまでを第Ⅳ期としたが、これはAASHO 時代と呼ぶにふさわしい。この時期アメリ

カは“1960年代における舗装の研究の成果は過去100年の蓄積を上回る”と豪語した。オイルショックは、公共事業全般にとってショックであり、舗装分野では原油事情の変化によって、アスファルトの物性も急変し、トラブルが続出するようになった^{61), 62)}。関係者の努力によって危機的状況を脱した日本は、まだ幸いであったというべきであろう。この時期以降の第Ⅴ期は、舗装のリサイクリング、改質アスファルトの研究、Pavement Management System の開発⁶³⁾など、多焦点時代、また流動化時代とも呼べる時代で、後世からすればPMS時代と呼べるかもしれない。

2. 舗装の構造・パフォーマンスと材料物性との関係

アスファルト舗装にあっては、その構造と材料物性は不即不離の関係にあり、舗装に生ずる問題の多くは、構造と材料の双方から改善が図られることが必要であるが、なかには材料物性の面のみで改善されることも少なくはない。

1958年から1961年にかけて実施されたAASHO 道路試験⁸⁾の成果はまことに目覚ましいもので、その成果はパフォーマンスと材料物性の関係に明確な指針を与えるものであった。これらの研究成果のうち本稿に直接関係するものとして、

- a. サービス指数概念の確立
- b. 等値換算係数としての材料特性の設計への適用
- c. 構造指数, SN, 概念の確立

の3つが挙げられる。さらに1962年公表された新設計法⁹⁾は、以降の舗装設計法ならびに材料の性状評価法に決定的ともいえる指針を示した。等値換算係数は、層構

* 正会員 工博 北海道大学工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

表—1 アスファルト舗装における研究の流れ

期	年 代	舗 装 構 造	材 料 物 性	主要なもしくは先駆的な研究業績
第Ⅰ期	～1926 (プレ CBR 時代)	路床・路盤の明確な概念なし，変形しない舗装，ひびわれしない舗装，いわば“手さぐり”，やってみる時代	ハッパード・フィールド試験 (1920)	(石油アスファルトの出現，1908 年)
第Ⅱ期	1927～1945 (CBR 時代)	<ul style="list-style-type: none"> ●CBR 設計法の提案 (1927)，設計の概念の出現 ●路床・路盤の重視 ●厚み重視の設計 	<ul style="list-style-type: none"> ●混合物の配合設計の必要性が徐々に認識される。 ●Hveem Stabilometer (1930) ●マーシャル試験による配合設計法と品質管理法 (1943) ●アスファルトの物性研究 	Lewis らによるアスファルトと混合物の物性研究 (1945) ¹⁾ Abraham の “Asphalt and Allied Substances” 発行 (1945)
第Ⅲ期	1946～1961 (マーシャル時代)	<ul style="list-style-type: none"> ●舗装構造の重視 ●AASHO 道路試験開始へ (1958) ●AASHO 道路試験の成果の公表 (1961)⁸⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> ●混合物の浸水安定度規格化 (1954) ●混合物の安定性解析 ●施工技術の高度化 ●締固めの研究 (1955～57) ●マーシャル法の普及，規格化 (1958) ●アスファルトの老化研究 (1950 年後半) ●アスファルト安定処理の研究 (1961) 	Nijboer による混合物の 3 軸試験 (1948) ²⁾ McLeod による合理的配合設計法の提案 (1950) ³⁾ van der Poel によるアスファルトのスチフネス論 (1954) ⁴⁾ Nijboer によるサンドアスファルトの疲労研究 (1954) ⁵⁾ Hveem による舗装の限界たわみ (1955) ⁶⁾ Benkelman による舗装のたわみ研究 (1958) ⁷⁾ Lee によるアスファルト混合物の荷重分散性能 (1959) Monismith らによる一連の物性研究 (1956～) ²⁴⁾ AASHO 道路試験成果の公表 (1961) ⁸⁾
第Ⅳ期	1962～1973 (AASHO 設計法時代)	<ul style="list-style-type: none"> ●AASHO 新構造設計提案 (1962)⁹⁾ ●Serviceability 概念の確立 ●層構造解析の一般化 ●舗装構造の力学評価 ●フルデプス舗装 ●日本の舗装要綱，等値換算係数を導入，新設計法をとる (1967) ●PMS 研究スタート⁸³⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> ●等値換算係数の概念確立 ●物性評価の時代へ²⁴⁾ ●変形係数の重視 ●疲労研究の活発化¹⁶⁾ ●力学試験による材料物性評価研究ほぼ終了 (1970) ●アスファルトの粘度分類 AASHO 規格化へ (1971)^{14), 15)} 	AASHO 新構造設計法提案 (1962) ⁹⁾ Whiffin による層構造解析の舗装への応用 (1962) ¹⁰⁾ Rostler によるアスファルトの組成研究 (1962) ¹¹⁾ Hveem らによるアスファルト規格の合理化提案 (1963) ¹²⁾ Heukelom による混合物のスチフネス論 (1964) ¹³⁾ (疲労設計法の提案) アスファルトの粘度研究 (1966, 1967) ^{14), 15)} 混合物の疲労研究 (1971) ¹⁶⁾ 材料の疲労と動的試験法 (1973) ¹⁷⁾
第Ⅴ期	1974～ (多焦点時代/PMS 時代)	<ul style="list-style-type: none"> ●第Ⅳ期の継続，経済性重視時代 ●変形予測法焦点に ●PMS 焦点に 	<ul style="list-style-type: none"> ●オイルショックによるアスファルトの品質問題深刻な課題に^{81), 82)} ●Heavy Duty Asphalt の開発^{80), 80)} ●リサイクリング時代へ²²⁾ ●混合物の表面物性への集中的研究^{18)～20)} 	混合物の表面物性 (1975, 1980) ^{18)～20)} 混合物の低温性状 (1977) ²¹⁾ 混合物のリサイクリング (1978) ²²⁾ 舗装の新材料，新工法 (1979) ²³⁾

造解析論¹⁰⁾に従えば，変形係数の一表現法とも呼べるもので，疲労抵抗性，耐久性その他を加味した変形係数表現法と考えることができる。

3. 混合物の主要な物性

(1) 主要な物性

過去の多くの研究によって，舗装用混合物にとって大事な物性は次のようなものであることが広く知られている²⁴⁾。

- 流動への抵抗性としての安定性 (Stability)
- たわみ性 (Flexibility)
- 破壊強度 (Fracture Strength)
- 疲労抵抗性 (Fatigue Resistance)
- 温度応力亀裂への抵抗性 (Thermal Fracture Property)
- 滑り抵抗性 (Skid Resistance)

g. 耐久性 (Durability)

h. 透水性・透気性 (Permeability)

a. から e. までは力学的物性であり，共通して混合物の変形係数に関係するものであって，粘弾性学的 (Rheological) な検討を必要とする。舗装の設計や構造の力学的な評価のために，インプットしやすいかたちで求められることが望ましく，1960 年代の材料研究の努力は集中的にこの面に注がれた。

f. は表面物性と呼ばれるもので，交通安全上の問題として最近特に力が注がれている^{18)～20)}。

g. は施工時と供用時の材料の劣化に基づく材料の性能低下であり，これにははく離性状も含めて考える。

h. は材料の耐久性に影響を与える要因の 1 つであり，また逆に透水性を向上させて，滑り抵抗を向上させたり，路盤路床へ水を浸透させたりする工法では大事な性状である。

この項では紙数の関係上物性値はすべて省略して研究の大筋について述べるにとどめよう。

(2) 混合物の変形係数

粘弾性体では変形定数を弾性係数と呼ぶのは適切ではないので変形係数 (Stiffness) の名で呼ばれることが多い。多くの場合応力-ひずみ関係は曲線で示されるので、単に σ/ϵ を変形係数と呼ぶ場合 (割線の勾配)、応力-ひずみ曲線の勾配で呼ぶ場合 (接線勾配、緩和弾性率)、動的試験によって得られる複素弾性率など種々の表現法がある。

アスファルトの変形係数に関する最初の研究成果は、1954 年 van der Poel によって広範囲のアスファルトについて、広い時間、温度領域にわたるスチフネス・ノモグラムとして発表された⁴⁾。これには R. N. Saal の粘弾性定数としての PI (Penetration Index) が含まれる。van der Poel スチフネスの名で呼ばれるこれらの変形係数は、時間と温度に依存する単なる σ/ϵ の形で示されたものである。その後 1964 年 Heukelom, Klomp によって混合物のスチフネスを求める実験公式¹³⁾が明らかにされた。なお図-1 は骨材体積率ごとに、van der Poel スチフネスによって混合物の変形係数がどのように変化するかを示したものであり、次式はそれを公式化したものである。

$$\frac{S_{mix}}{S_{bit}} = \left(1 + \frac{2.5}{n} \frac{C_v}{1 - C_v}\right)^n$$

ここで、 $n = 0.83 \log \frac{4 \times 10^5}{S_{bit}}$ 、 C_v : 骨材体積率

S_{mix} : 混合物のスチフネス (kgf/cm²)

S_{bit} : アスファルトのスチフネス (kgf/cm²)

図-1 アスファルト混合物の変形係数 (Heukelom-Klomp による)¹³⁾

この2つの研究成果は、アスファルトに関係する研究報告に、AASHO 道路試験の結果と並んで最も多く引用されている。またこの Heukelom 論文は実質的に舗装構造の疲労設計への具体的提案でもあり、構造設計のうえでも注目される。

その後 Monismith ならびに多くの研究者によって、混合物の変形係数に温度・時間換算則が適用できる²⁵⁾ことが確認された。

1970 年代に入ってから、Heukelom による混合物のスチフネスを、高温・長時間領域に拡大すべく van de Loo²⁶⁾によって研究が続けられ、それを受けるかたちで牛尾・菅原によって、長時間・高温領域での S_{bit} - S_{mix} のいわゆるクリープ曲線²⁷⁾が作られた。この曲線と Heukelom 公式との併用によって舗装用混合物のほとんどの載荷時間・温度領域が網羅される。

(3) 安定性

変形・流動抵抗性は舗装始まって以来の課題であり、古くは Hubbard-Field Test (1920)、Marshall Test (1943 開発²⁸⁾)、3 軸試験 (1948)、Hveem の Stabilometer (1930)、Wheel Tracking Test (1950 年代後半) などの試験装置が次々と開発された。Nijboer による 3 軸試験²¹⁾はまさに先駆的研究であり、その後も多くの研究者によって研究が続けられてきたが、供試体の製作の困難性と、混合物はそれ自身で形状を保つことができ、より簡単な試験で目的を達し得るなどの理由でつい主流の座を占めるに至らなかった。他の試験はすべて工学的な方法で、主としてパフォーマンスとの関係で利用されてきた。Wheel Tracking Test は英国道路研究所の開発にかかり、実用との相関のよいことからわが国でも広く用いられている。最近に至り、この試験から混合物の変形係数の計算が可能となり用途が拡大された²⁶⁾。Marshall Test²⁸⁾についてはここに述べるまでもないが、わが国では安定度とフローの比を変形係数の一種とみなして利用している。これは Heukelom らによって Marshall Stiffness と呼ばれているものである。また最近はいろいろな変形係数測定法が開発され²⁴⁾、いろいろな応力状態のもとで測定が可能になり、研究面では、安定性の解析には変形係数が用いられる。しかしこれは決して実用面でのマーシャル試験の有用性を否定するものではない。

(4) たわみ性

たわみ性という用語は誤解されやすい用語であるが、現在の工学的定義では、長期的な地盤、路床などの変形への追従性とされており、走行車輛に対して大きなたわみを許すという意味では用いられていない。したがって研究的な角度からはほとんど検討されず、また技術上の課題ともならない。

(5) 破壊強さ^{29)~32)}

破壊強さに関しては1970年頃までにはほとんど研究しつくされた感があり、現在では新開発材料の性能評価によく用いられている。

曲げ破壊³²⁾に例をとれば、温度-強度曲線はピークをもつ山形曲線で示され、このピークは変形速度に対応して規則正しく、低温側、高温側へ移動する。ピークより低温では骨材のわれを伴うような脆性破壊、高温側では流動を伴う破壊を示し、ピークは脆化点の名で呼ばれる。

実験技術上一軸引張試験はきわめて困難で、過去において Monismith³³⁾の限定された領域での研究成果があるのみである。これに対し Kennedy らは図-2に示すような、ある幅をもった載荷板をもってする圧裂試験(In-direct Tension, Split Test, Brazil Test などいろいろな名で呼ばれる)について応力解析・試験法開発を行った³⁴⁾。この方法はここ数年アメリカ・カナダで広く普及し、さらに繰返し載荷・疲労研究にも用途が拡大している。この試験では、強さのほか破壊ひずみ、変形係数も求められる。マーシャル供試体をそのまま利用でき、さらに抜取りコアにも応用することができ用途は広い。

図-2 Kennedy らによって解析された圧裂試験の応力分布³⁴⁾

なおアスファルト・コンクリートの低温・高速載荷時の最高強さは、圧縮強さ 450 kgf/cm²、曲げ 110 kgf/cm²、引張り 70 kgf/cm²に達する。これらは一般には想像しがたい数値かもしれない。

(6) 疲労抵抗性

Hveem によって舗装が疲労破壊することが指摘された³⁵⁾のは1948年であり、さらに Hveem による舗装体のたわみ限界値⁶⁾が示されたのは1955年であった。以降1970年頃まで、第一線の研究者が一斉にこの問題に取

り組み、華々しい研究の進展がみられた。そのなかでも Heukelom・Klomp¹³⁾、Saal・Pell³⁶⁾、Monismith^{37), 38)}、Papazian・Baker³⁹⁾、Pell⁴⁰⁾の研究が著名であり、渡辺・丸山⁴¹⁾、笠原・菅原⁴²⁾の日本の研究成果がこれに加わる。これらの成果は、AASHTO 道路試験の結果と総合して、路盤の強化、構造の強化など今日の設計法をもたらした。

疲労性状を要約すれば、

(a) 破壊に至る載荷回数、 N_f の対数は、与える応力またはひずみの対数と直線関係にある。図-3はその一例である³⁸⁾。

(b) 変形係数の高いほど疲労抵抗性は大きい。

(c) ひずみで制御するか応力で制御するかによって破壊回数は異なる。応力制御の方が N_f は小さい。

(d) N_f は空隙率、飽和度に依存する⁴⁰⁾。

(e) 疲労の進行につれて変形係数は低下する。

(f) 異なる応力・ひずみの複合も、ダメージの累積加算によって処理できる³⁷⁾。

現在の舗装厚は設計の面から十分疲労破壊に抵抗できるものとなつてはいるが、松野の指摘するわだちわれ⁴³⁾はわが国特有の表面から成長する疲労破壊の可能性があり、今後の解明が待たれるところである。

図-3 疲労破壊におけるひずみと破壊回数との関係 (Monismith による)³⁸⁾

(7) 温度応力亀裂抵抗性

1960年代以降、アメリカ北部、カナダに低温での応力緩和性能の不足に伴う破壊が多発し、オイルショック以降アメリカの過半数 26 州にこの種の破壊が発生、わが国北海道でも1970年代半ばから発生が報告されるなど、アスファルト舗装の力学的根拠(応力緩和)の根幹にもかかわり、さらに効果的な対策が見出せないままに深刻さを増している。これらに関してはアメリカ、カナダできわめて多数の研究成果が発表されてきており、今もそれが続いている。それらの結果によれば、温度が低下して混合物の変形係数が一定限度を超えたときに発生すること、軟質アスファルトの利用による以外具体的な解決策のないことなどが明らかにされてきた。これらに関しては Haas らによって総合的な考察⁴⁴⁾が試みられて

図-4 設計想定温度において選択されるアスファルトの針入度 (Phang らによる)⁴⁴⁾

図-5 棒状供試体に生ずる温度応力と破壊温度 (菅原らによる)⁴⁵⁾

おり、そのなかで Phang らによる使用アスファルトのコンシステンシーのガイドラインが図-4 のように示されている。

室内的な研究で直接温度応力を発生させて破壊させた系統的な研究はほとんどみられず、菅原・森吉らの混合物の棒状試料の温度応力破壊実験があるのみである⁴⁵⁾。図-5 はその実験結果の一例である。実際の舗装では、舗装がある幅にわたって側方に拘束されていることを考えれば、図に示される結果より数度(°C)高い温度で破壊すると予測される。この温度は軟化点からの温度差として把握されるべきものではないかと考えられている。しかしこの種の亀裂対策として軟質アスファルトを使用することはわだち掘れ対策と全く逆行することになり、

とるべき対策とはなりにくい。

(8) その他の性状

滑り抵抗性^{46)~50)}、耐久性、透水・透気性なども長い研究の歴史が積み上げられてきた分野である。特に滑り抵抗性に関するここ約10年のカナダのオンタリオ州グループの研究の進展はめざましい。Shonfeld⁴⁶⁾によって考案された路面のステレオ写真による粗さ表現はのちに ASTM 規格⁴⁸⁾に取り入れられ、路面性状の Micro-Texture, Macro-Texture などとしてコード化され、さらに Kamel ら⁴⁹⁾によって研究の進展をみた。つづいて Parcels らによって室内実験による路面の再現も試みられた⁵⁰⁾のは注目すべき動向であり、この表面性状には混合物の配合、骨材の性質、アスファルトの性質が関係することが明らかにされている。

一方、混合物の Aging, 耐水性なども数十年にわたる研究の歴史をもち、老化したアスファルトのパフォーマンスが悪いことから、抽出アスファルトがいかに変化していくかが追及されてきた。古くは、Shattuck の研究に始まり、針入度がある限界より小さくなった時点でひびわれが多発すること、地域によって限界の針入度が異なることなどが報告されている。

図-6 Kandahl らによるペンシルベニア州の道路試験におけるアスファルト混合物の空隙率の変化と抽出アスファルトの粘度の変化⁵¹⁾

アスファルトの粘度分類が行われるようになり、さらにオイルショック以降の混乱^{61), 62)}などによって、耐老化性についても見直しの気運が生じ、さらにわが国でも、流動防止目的のためアスファルト量が小さくなるなど混合物の方も変化しており、あらためて耐久性問題がクローズアップされようとしている。

これら一連の研究のなかで Kandahl ら⁵¹⁾は注目すべき研究の成果を発表し、60°C粘度と同時に25°C粘度にも注目すべきこと、アスファルトのレオロジー性状に注目すべきこと、アスファルトによって著しく耐老化性が異なることなどを示した。これに関連した研究発表も数多くみられるようになってきている。図—6はKandahlによる試験道路での研究成果の一部であり、18~24か月程度でAgingの大勢は定まること、さらに空隙率が5%以下になればAgingの進行は停止もしくは停滞すること、初期の圧密が重要な因子であることなどを明らかにしている。

(9) 物性研究とその舗装技術への応用

以上述べてきたように、材料の物性研究は、時の流れ、ニーズによって着実な歩みで進展を続けてきた。

これらのなかで、ASTMのシンポジウム、TRBのシンポジウムあるいは研究論文集での集中的な議論、AAPTの一連のシンポジウムなどは、単にアメリカにとどまらず、世界の第一線の知識の集約でもあり、それらがこの分野の発展に顕著な功績を残したものと評価されよう。これらのうち、最近のカナダ・オンタリオ州グループの研究の進展が特に注目される。

(10) アスファルト化学研究者による研究

本稿では化学的見地からするアスファルトの性状には触れることができなかった。しかし、この分野で古くはオランダのJ. Ph Pfeifferに加え、3人のアメリカの研究者F. S. Rostler, H. E. Schwyer, R. H. Traxlerなど化学分野の人々が残した研究成果は、舗装材料技術の進展にきわめて大きく貢献したものと評価されるものであることを付記しておく必要があろう。アメリカのこの3人がアスファルト研究の第一線から引退したのは奇しくもオイルショックの時期であった。

4. リサイクリング

いま世界は、3R時代から4R時代に入ったといわれる。3Rとは、Reconstruction, Rehabilitation, Resurfacingの3つを指し、4番目のRはRecyclingである。各国とも、1960年代にかつてないほどの勢いで建設された舗装はいまいつせいに更新期に入ろうとしている。わが国のリサイクリングはいまのところ廃材の利用や表層材料のリサイクルにとどまるが、それらに加え、舗装構造全体のリサイクルが話題になりつつあるの

が世界の動向といえよう。この意味ではリサイクリングにはかつてない広範な研究課題がひしめいており、現在次のようなことが検討されつつある。

(1) リサイクリングの対象

舗装の改良を行おうとする場合それがRehabilitation程度ですむのか、Resurfacingなのか、あるいは全体のReconstructionなのか、Recyclingは不可能なのか、などの判断技術の確立が強く求められている。これはServiceabilityと構造強度評価の双方から判断される性格のものである。ここでいう構造強度評価は舗装体のなかにあつての材料の物性評価そのものであるともいえよう。

(2) 工法選択

用い得る工法は多種多様であり、地域的事情、経済性、技術的な問題などから工法が選択される（本稿では工法に関しては省略）。

(3) リサイクリングに供する材料の物性評価

(4) リサイクリング後の材料の配合の設計

(5) 資源的、エネルギー的な考察

1978年、TRBはアメリカにおけるリサイクルの実績、工法、経済性に関する詳細な調査報告を作成し⁵²⁾、リサイクリングは将来の道路舗装にとって技術的、経済的にきわめて有用な方法であると結論している。

また一方、この前年ASTMは、材料的な見地から“Recycling of Bituminous Pavements”と題するシンポジウムを開催し²²⁾、問題点の指摘と解決策などについて検討し、技術的可能性を追及している。この種の研究は、単にアメリカにとどまらずヨーロッパ各国でも同様に進められている。

材料物性面についてそれらの研究課題を眺めてみると

(a) 廃棄ないしは既存舗装の材料の評価

(b) パージン・アスファルト、再生剤(Reclaiming Agent)添加の必要性の有無、性質と量の検討、場合によっては離防止剤の添加の必要性の有無

(c) 再生混合物への新規材料の添加の必要性

(d) 再生混合物の材料物性の評価と配合設計法などである。

これらのなかでDavidson⁵³⁾はいかなる再生剤がいかなる量使用されたらよいのかについて検討し、再生剤の効果は相手となるアスファルトの性質に依存すること、単にコンシステンシーを回復させるのみでなく、化学的成分¹¹⁾についても目を向けるべきだとして、再生剤について化学的組成をも考慮に入れた再生剤の規格案を提言した。

さらにKennedyら^{54), 55)}は、再生混合物の設計について詳述し、予備的設計からステップを踏んで最終的な配合設計を行うのがよいとし、さらにIn-direct Tension

Test を用いて再生混合物に要求される力学的性状を求めるのがよいとし、24℃において次の性質をもつことを必要とした。

- 引張強さ 5.2~14.4 kgf/cm²
- 静的変形係数 0.7~3.6×10⁴ kgf/cm²
- 動の変形係数 1.8~6.6×10⁴ kgf/cm²

(ただし Texas 州での数値、地域が異なればその気象条件に応じて変化するものであろう)

ここで注目すべきことは、各基準値に上・下限を設定していることである。さらに Kennedy は疲労試験の必要性についても言及している。

5. わだち掘れ対策について

わだち掘れに関しても幾多の変遷を経て今日にまで研究が続いている。そのかげには常に交通量の激増という問題があった。なかでもわが国は他に例をみない酷な条件下にある。ここでは2つの課題すなわちわだち掘れ予測と改質アスファルトによるわだち掘れ対策について述べておく。

(1) わだち掘れ予測について

わだち掘れ予測は、Pavement Management System の一環として研究がスタートしたもので1970年代半ばにいったいに研究報告がみられるようになった。1976年にはTRBがこの問題について特集を組んでおり⁵⁷⁾、多くの優れた成果が公表されている。このなかで、Monismith がその全容についてレビューを試みているのが参考になろう。いずれの研究者も、層構造解析、ないしは有限要素法による舗装体内の応力・ひずみの解析が可能だとの前提にたち、これらの応力・ひずみによって各層・路床に生ずる厚みまたは変形を計算し、その加算によってわだち掘れ深さが計算できるとし、実際の道路または、試験走行路でのわだちとの相関をとってよい結果を得たとしている。研究手法の差は、もっぱら材料

のクリープをどのような手法で求めるかにあるが、多くは最終的には変形係数として処理する方法をとっている。

図一7は Morris, Haas らによる予測値と路上での実測わだち深さとの関係を示したものである⁵⁸⁾。

(2) 改質アスファルトによるわだち掘れ防止

わだち掘れを構造強化という方向のみで解決しようとしてもそれは現実的ではないし、日本では特に実情に合致しない。そこで生まれたのが、表層、場合によっては基層までに、粘度の高い(すなわち混合物の変形係数の高い)アスファルトで対応しようとするのが、わが国のここ10年の動きである。昭和53年アスファルト舗装要綱の改訂にこの趣旨が盛られ、セミブローン・アスファルトや添加剤によるアスファルトの改質が取り上げられた。

改質アスファルトは大きく2つの系統に分けられる。1つはオーソドックスな方法、すなわち、アスファルトを本質的に硬く、そして感温性を小さくするセミ・ブローイング法を用いた高粘度アスファルトであり、もう1つは、分子量が高いゴムあるいは熱可塑性樹脂を添加する方法である。一部には熱硬化性のエポキシ樹脂の利用もある。前者には1950年代からの試みがヨーロッパにあり、1960年代にかなり大規模に利用されていた。いま日本で用いられる AC-100, 140 と呼ばれるものはその空気吹き込みをより強化したものであり、多田によ

図一7 Morris-Haas らによるわだち掘れ予測値と実際の道路に発生した永久変形との関係⁵⁸⁾ (カナダにおける例)

図一8 ロールドアスファルトにおける変形抵抗性に影響を与えるいろいろな因子 (Czatkowski による)⁶⁰⁾

る詳細な研究報告⁵⁹⁾その他多くの貴重な研究成果の報告がある。

一方これらと同じような考え方でイギリスの道路運輸研究所の報告⁶⁰⁾もみられる。図—8はCzatkowskiによる性状改善概念図である。

この分野に関しては、その施工性や、相対的に低温で生ずるひびわれ抵抗性の低下、Recyclability（リサイクルができるか否か）などの検討が必要とされ、今後の研究の展開が待たれる。なかでも地域ごとに変形係数の上・下限値が示されるならば応用範囲はさらに拡大されるであろう。

6. 今後の研究の動向

ここで今後の研究の発展の動向について触れておきたい。

(1) アスファルトの品質のばらつき対策

オイルショック以降、世界的にみてアスファルト間の性状の差は拡大し、アメリカでは混乱ともいえる状態が発生^{61), 62)}して粘度規格見直し論すらみられる。舗装の施工技術の進歩に伴って、施工上ではかなりの性状差に耐えられる状況にはあるが、これに伴う早期劣化や、舗装後6か月で温度応力亀裂の発生がみられたり、またその発生地点が年を追って南下（北海道の例）している等のことから考えれば、わが国においても大きな問題となってきたといえよう。加えてアスファルト中のパラフィン分の増加が一体何をもちこたすのかも検討課題である。これらは将来というよりも、むしろ緊急の課題と呼ぶべきものであろう。

(2) 構造評価と材料評価

構造の評価はただちに各層の材料の疲労なり、老化なりの評価にも連なる問題である。各種の動的構造評価手法を応用して、材料を現地で、しかも非破壊で測定する技術の進展が期待される。当然それらに関連してデータ・バンクの整備もクローズ・アップされよう。

(3) 舗装のリサイクリング

リサイクリングにおいては、廃棄物のリサイクリングからさらに一歩進んだ、上・下層路盤のリサイクリングまで、いわば舗装全体のリサイクルの方向が追求されることになる。特に砂利、碎石などの主として下層路盤層に関しては、リサイクルと同時に、セメント、アスファルト乳剤などの常温混合方式をとったグレード・アップ工法も大きな課題である。この分野は施工技術がすでに確立されているので実現は早いであろう。

(4) 舗装の老化防止対策

わだち掘れ対策に伴ってアスファルトは硬質に、また使用量は必然的に小さくなる。それに伴って舗装体中のアスファルトはAgingを早く受けることになり、一部

には欠陥も出始めているといわれる⁴³⁾。この点に関しての今後の研究課題は入念な施工と併行して、耐用年限のながい酸化防止剤、はく離防止剤の開発になろう。

(5) 改質アスファルトについて

これに関しては性能の向上および施工性の改善、Recyclabilityなどと、地域性を加味した材料性能の早期の基準化が期待される。

(6) わが国の実状に即したわだち掘れ予測システムの開発、特にアスファルト安定処理層の変形評価

(7) 材料物性全般について

材料物性は常に構造特性を考慮に入れて検討されなければならない。日本の気象・交通が特殊なだけに、日本としての独自の技術展開が要求される。特に最近の世界の研究の動向は“戦略”とも呼ぶべき Pavement Management System⁶³⁾にすべての技術が集大成されようとしており、そのなかで材料物性もきわめて大事なサブ・システムを構成していることに特に注目したい。

おわりに

以上アスファルト材料の物性を中心に研究展望を試みた。精粗においていささか整合性を欠くかもしれないが大きな流れを紹介することに主眼をおいてとりまとめた。ご叱正いただければ幸いである。わが国の研究については従来よく紹介されているので最小限にとどめたことをお許しいただくことにする。

参 考 文 献

- 1) Lewis, R. H. and Welborn, J. Y. : A Study of the Effect of Characteristics of Asphalts on the Physical Properties of Bituminous Mixtures, Proc. AAPT, Vol. 17, 1948.
- 2) Nijboer, L. W. : Plasticity as a Factor in the Design of Bituminous Road Carpets, Elsevier, 1948.
- 3) McLeod, N. W. : A Rational Method of Design for Bituminous Paving Mixtures, Proc. AAPT, Vol. 19, 1950.
- 4) van der Poel, C. : A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, 1954.
- 5) Nijboer, L. W. : Mechanical Properties of Asphalt Materials and Structural Design of Asphalt Roads, HRB, Proc., Vol. 33, 1954.
- 6) Hveem, F. N. : Pavement Deflections and Fatigue Failures, HRB, Bull. 114, 1955.
- 7) Benkelman, A. C. : Analysis of Flexible Pavement Deflection and Behavior Data, HRB, Bull. 210, 1958. ほか関連論文2編
- 8) “The AASHO Road Test” HRB, Special Report 61 A~61 G, 1961.
- 9) “The AASHO Road Test” HRB, Special Report 73, 1962.

- 10) Whiffin, A.C. et al. : The Application of Elastic Theory to Flexible Pavements, Proc. International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1962.
- 11) Rostler, F.S. et al. : Composition and Changes in Composition of Highway Asphalts, 85-100 Penetration Grade, Proc. AAPT Vol. 31, 1962.
- 12) Hveem, F., Zube, E. and Skog, J. : Proposed New Test and Specifications for Paving Grade Asphalts, Proc. AAPT, Vol. 32, 1963.
- 13) Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. : Road Design and Dynamic Loading, Proc. AAPT, Vol. 33, 1964.
- 14) "Grading of Paving Asphalts" ASTM, STP 424, 1967. 5 論文を含む
- 15) "Viscosity Testing of Asphalt and Experience with Viscosity Graded Specifications" ASTM, STP 532, 1973. 9 論文を含む
- 16) "Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures" ASTM, STP 508, 1972. 9 論文を含む
- 17) "Fatigue and Dynamic Testing of Bituminous Mixtures" ASTM, STP 561, 1974. 7 論文を含む
- 18) "Pavement Surface Characteristics and Materials" ASTM, STP 763, 1982.
- 19) "Surface Texture versus Skidding" ASTM, STP 583, 1975.
- 20) "Frictional Interaction of Tire and Pavement" ASTM, STP 793, 1983.
- 21) "Low Temperature Properties of Bituminous Materials and Compacted Bituminous Paving Mixtures" ASTM, STP 628, 1977.
- 22) "Recycling of Bituminous Pavements" ASTM, STP 662, 1978.
- 23) "Asphalt Pavement Construction : New Materials and Techniques" ASTM, STP 724, 1980.
- 24) "Factors Involved in the Design of Asphaltic Pavement Surfaces" HRB, NCHRP, Report 39, 1967. (1967 年以前の物性研究の総括)
- 25) Secor, K.E. and Monismith, C.L. : Analysis and Interrelation of Stress-Strain-Time Data for Asphalt Concrete, Trans. The Society of Rheology, Vol. VIII, 1964.
- 26) van de Loo, P.J. : Creep Testing, A Simple Tool to Judge Asphalt Mix Stability, Proc. AAPT, Vol. 43, 1974.
- 27) 牛尾俊介・菅原照雄 : アスファルトの工学特性(第3報), アスファルト混合物の変形特性, とくにクリープ特性について, 石油学会誌, 第24巻, 第4号, 1981.
- 28) Mc Fadden, G. and Ricketts, W.C. : Design and Field Control of Asphalt Paving Mixtures for Military Installations, Proc. AAPT, Vol. 17, 1948.
- 29) Rigden, P.J. and Lee, A.R. : The Brittle Fracture of Tar and Bitumens, Journal of Applied Chemistry, Vol. 3, 1953.
- 30) Mack, C. : Physical Properties of Asphalts in Thin Film, Industrial and Engineering Chemistry, Mar. 1957.
- 31) Monismith, C.L. et al. : Rheologic Behavior of Asphalt Concrete, Proc. AAPT, Vol. 35, 1966.
- 32) Sugawara, T. : A Mechanical Response of Bituminous Mixture under Various Loading Conditions, Proc. of Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London, 1972.
- 33) Salam, Y.M. and Monismith C.L. : Fracture Characteristics of Asphalt Concrete, Proc. AAPT, Vol. 41, 1972.
- 34) Anagnos, J.N. and Kennedy, T.W. : Practical Method of Conducting the Indirect Tensile Test, Research Rep. 98-10 Center for Highway Research, The University of Texas, 1972.
- 35) Hveem, F.N. and Carmany R.M. : The Factors Underlying the Rational Design of Pavements, HRB Bull. 114, 1948.
- 36) Saal, R.N.J. and Pell, P.S. : Fatigue Characteristics of Bituminous Road Mixes, British Society of Rheology, 1959.
- 37) Monismith, C.L. and Deacon, A. : Fatigue of Asphalt Paving Mixture, Proc. ASCE, Vol. 95, No. TE 2, 1969.
- 38) Monismith, C.L. : Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure, IER Rep. No. TE-63-2, TE-64-2, TE-65-9, University of California, 1963, 1964, 1965 (respectively).
- 39) Papazian, H.S. and Baker, R.F. : Analyses of Fatigue Type Properties of Bituminous Concrete, Proc. AAPT, Vol. 28, 1959.
- 40) Pell, P.S. and Cooper, K.E. : The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials, Proc. AAPT, Vol. 44, 1975.
- 41) 丸山暉彦・渡辺 隆・吉原一彦 : アスファルト混合物の疲労破壊包絡線, 土木学会論文報告集, No. 306, 1981-2.
- 42) 笠原 篤・菅原照雄 : 繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について, 土木学会論文報告集, No. 235, 1975-3.
- 43) 松野三朗 : わだち割れ (1), アスファルト舗装の縦表面クラックについて, 舗装, Vol. 19, No. 2, 1984.
- 44) Haas, R.C.G. : A Method for Designing Asphalt Pavement to Minimize Low Temperature Shrinkage Cracking, The Asphalt Institute Research Report 73-1, 1973.
- 45) Sugawara, T., Kubo, H. and Moriyoshi, A. : Low Temperature Cracking of Asphalt Pavements, Proc. Paving Cold Areas, Mini-Workshop, Canada/Japan Science and Technology Consultations, 1982.
- 46) Schonfeld, R. : Photo-Interpretation of Pavement Skid Resistance, RR 188, Research and Development Division, Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario, Canada, June 1974.
- 47) Holt, F.B. and Musgrove, G.R. : Surface Texture Classification : A Guide to Pavement Skid Resistance, ASTM, STP 763, 1982.
- 48) ASTM, E 770-80 "Standard Test Method for Classifying

- Pavement Surface Textures”
- 49) Kamel, N., Musgrove, G.R. and Rutka, A. : Design and Performance of Bituminous Friction Course Mixes, TRB, Record 843, 1982.
 - 50) Parcels, W.H. Metheny, T.M. and Maag, R.G. : Predicting Surface Friction from Laboratory Tests, TRB, Record 843, 1982.
 - 51) Kandahl, P.S. et al. : Asphalt Viscosity-Related Properties of In-Service Pavements in Pennsylvania, ASTM, STP 532, 1973.
 - 52) “Recycling Materials for Highways” TRB, NCHRP Synthesis 54, 1978.
 - 53) Davidson, et al. : Practical Aspects of Reconstituting Deteriorated Bituminous Pavements, ASTM, STP 662, 1978.
 - 54) Kennedy, T.W. et al. : Preliminary Mixture Design Produced for Recycled Asphalt Materials, ASTM, STP 662, 1978.
 - 55) Kennedy, T.W. et al. : Quality-Assurance Consideration in Design of Recycled Asphalt Mixture, TRB, Record 885, 1982.
 - 56) Little, D.N. and Epps, J.A. : Evaluation of Certain Structural Characteristics of Recycled Pavement Materials, Proc. AAPT, Vol.49, 1980.
 - 57) Monismith, C.L. : Rutting Prediction in Asphalt Concrete Pavements, TRB, Record 616, 1976.
 - 58) Morris, J., Haas, R.C.G. et al. : Permanent Deformation in Asphalt Pavement Can Be Predicted, Proc. AAPT, Vol.43, 1974.
 - 59) 多田宏行：アスファルトの粘度調整による舗装の流動防止に関する研究，土木学会論文報告集，第332号，1983-4.
 - 60) Czatkowski, W.S. : Rolled Asphalt Wearing Courses with High Resistance to Deformation, the Performance of Rolled Asphalt Surfacing (Symposium 報告書), Institution of Civil Engineers, 1980.
 - 61) American Association of State Highway Officials Committee on Materials : Survey of Recent Asphalt Paving Problems, 1978.
 - 62) Wilson, J.E. and Hicks, R.G. : Evaluation of Construction and Short-Term Performance Problems for Asphalt Pavements in Oregon, Proc. AAPT, Vol.48, 1979.
 - 63) “Pavement Management System Development” TRB, NCHRP Report 215, 1979.

(1984. 3. 14・受付)