

招待論文  
*Invited Paper*

# 招待論文

## アスファルト舗装の設計法の変遷と最近の研究の動向

### STATE OF THE ARTS : ASPHALT PAVEMENT DESIGN

菅原照雄\*

By Teruo SUGAWARA

#### 1. 概 説

長い道路の歴史の中で、アスファルト舗装がどのように位置付けられ、どのように研究され、時代とともにどのように変化してきたかについて、経済活動の発展、周辺技術の進歩、社会情勢を含めて、舗装構造の設計法を中心に歴史的な考察を加えてみたい。日本や諸外国の設計法についてはすでに数多く紹介されているので、ここでは代表的なものの紹介にとどめ、過去から現在に至る世界的な「大きな流れとしての舗装の設計思想の変遷」を中心に述べることにする<sup>1)~6)</sup>。使用した図や、末尾に挙げた参考文献には、多少古いものであっても、それぞれ1つの時代を画したと思われるものを挙げた。

本文中では略号を多く用いたので、その機関等の正式名称をまとめて記しておく。

ICSDAP : International Conference—Structural Design of Asphalt Pavements

AASHO : American Association of State Highway Officials, 1914年創立, 1973年 AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials に改称

HRB : Highway Research Board, 1920年創立, 1974年 TRB, Transportation Research Board に改称

NCHRP : National Cooperative Highway Research Program, HRB, TRB

SHRP : Strategic Highway Research Program, 1987年研究開始

FHWA : Federal Highway Administration

RRL : Road Research Laboratory, U.K., 1933年創立, 1972年 TRRL, Transport and Road Research Laboratory に名称変更

BPR : Bureau of Public Roads, 1970年に Federal Highway Administration に組織替え

CoE : Corps of Engineers, US Army

AAPT : Association of Asphalt Paving Technologists, 1924年創立

AI : The Asphalt Institute, 1919年創立

#### 2. 歴史的にみた道路舗装<sup>7),8)</sup>

ローマの道についてはここに多言を要しない。中国の秦の始皇帝は、路面に石をたたき込んで路面を補強した。イギリスはマカダム、テルフォードを生んだ国として、またフランスも18世紀において、ヨーロッパ最良の先進的な道路網を誇った国として注目の必要がある。アメリカは20世紀に入ってから、常に道路舗装技術とその研究で世界をリードしてきた。第2次大戦後の世界的な自動車時代の到来は、舗装技術に格段の進歩を促した。

舗装の概念の誕生は遠く車輪の発明にまでさかのぼる。人々は路面の強化なしには車輪は役に立たないことに気付いたに相違ない。さまざまな路面強化策がとられたことは、考古学的な発掘調査によって世界の各地で確認されている。

馬車、自動車などの道路を利用する交通手段(交通具)は、社会のさまざまな出来事、戦争、環境、産業経済などと複雑な相互作用をみせながら発展を遂げてきた。交

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

Keywords : pavement design, pavement structure, asphalt, elastic layer analysis, resilience modulus, California bearing ratio, AASHO road test, heavy traffic

表-1 自動車の発達と交通の推移

年代	舗装にとって重要な出来事
1769	フランスのキューニョの蒸気3輪自動車の発明
1814	スチブソンの蒸気機関車の発明
1817	自転車登場
1828	パリで乗合馬車走る
1832	ニューヨークで最初の鉄道馬車
1830	イギリスで長距離蒸気バスの実用化(鉄輪)
1850	イギリス完全に鉄道時代になる, 道路さびれる
1856	アメリカでソリッドゴムタイヤ誕生
1865	イギリスで馬車と自動車の軋轢強まる, 赤旗法制定
1873	電気自動車の誕生
1885	ベンツ, ダイムラーのガソリン自動車の実用化
1888	ダンロップによるタイヤの再発明
1890年代	アメリカで10t積み馬車の時代となる
1900	アメリカの自動車総数 8000 台
1908	T型フォードの出現とその驚異的な普及
1919	ディーゼル車の実用化
(1918)	Arlington Road Test 始まる
1921	アメリカの自動車総数 1000 万台
1925	同上 2000 万台
1930	ディーゼル車の急速な普及, 車両は大型化へ
1942	アメリカ, 最大軸重 18 kips, 4 輪車の総重量 30 kips, 3 軸以上の車両の総重量 40kips と決める
(1942)	CBR 設計法誕生
1951	アメリカの自動車総数 5000 万台
(1952)	WASHO 道路試験開始
1961	アメリカの自動車台数 7500 万台
(1961)	AASHO 新設計法誕生
1988	アメリカの自動車台数 1億8000 万台

通具の発達は、ただちに舗装の構造に直接的な影響を与えるものだった<sup>7)</sup>。

車両の走行抵抗の低減も常に人々の願望であった。経済活動が活発となり、人や物資の輸送距離が拡大した産業革命の時代に至ってこの要求はますます高まった。

乗合馬車、荷馬車の出現は道路に深刻な被害をもたらした。1700年代には馬車の鉄輪タイヤの幅を法律で制限することや、荷物に制限を加える等のが繰り返された。イギリスやアメリカのターンパイク(有料道路)では車輪の幅で料金に差がつけられた。

馬車時代の末期には、道路技術に名を残す3人の偉人、トレサゲ(Pierre Tresaguet)、テルフォード(Thomas Telford)、マカダム(John Loudon McAdam)らによって、砕石で路面を強化する工法が相次いで考案された。都市で普及した石畳も、一般の道路にあってはそれはあまりにも高価に過ぎた。自転車の実用化によって、防塵と路面の平滑性を求めてタール舗装の時代が幕を開けた。

都市への人口集中は、交通公害をもたらし、環境面から舗装に対する要求が高まった。

道路を車両の交通に合わせる時代が本格的に到来した

のは19世紀半ばで、それまでは道路に馬車の構造を合わせ、またその使用を制限することが普通だった。

タイヤの発明は、乗り心地の改善、路面の損傷の軽減などをもたらしたが、反面自動車の速度の向上は平坦性や粉塵の防止など、舗装に新たな課題を生んだ。舗装にかかわりの深い自動車の発達を表-1にまとめた。

自動車時代の到来は、舗装にマカダム工法から新工法への転換を促した。しかしアスファルト舗装技術の進展をみると、マカダム工法がその源流であったことは疑う余地がない。

このように舗装に要求される機能は時代とともに変化し、その時代の交通機関や環境と「折り合い」をつけながら、舗装技術は進歩を遂げてきた。

### 3. 舗装の統合システムとしてのペーパメント・マネージメント・システム—設計法の位置付け—

前節で「折り合い」という表現を用いた。これにさらに適切な用語を当てるとすれば、それは「統合的な舗装の運用」と置き換えることができるであろう。

最近話題にされる Pavement Management System, PMS, は一言でいえば「経済性をも包括した、計画、建設、維持など舗装の運用についてのトータルシステム」である。その目的は、限られた予算を効率的に使用して安全、快適かつ経済的な舗装を利用者に提供することにある。

1960年代後半、アメリカのいくつかの研究グループによって研究が進められ、技術システム、経済システムの統合として、舗装のマネージメントシステムの概念が誕生した<sup>9),10)</sup>。

1985年、AASHTOは「Guidelines on Pavement Management」を刊行<sup>11)</sup>し、さらにFHWAは1989年1月、舗装政策として20年から30年の将来を見越した「Pavement Policy」<sup>12)</sup>を明らかにした。この中で連邦の補助条件として、4年以内に各州に独自のPMSを策定することを義務付けた。現にアメリカでは都市単位でPMSを運用しているところも多い。

一方OECDもすでに国際協力のもとにPMS研究を開始し<sup>13)</sup>、世界銀行も、1969年に主として開発途上国援助の目的のもとに、道路全般にわたる道路マネージメントシステムとでもよぶべき、「The Highway Design and Maintenance Standard Study」委員会を発足させ、すでに18年間の国際協力による調査研究の成果が刊行され<sup>14)</sup>、一部はプログラム化され、世銀から提供されている。

舗装の設計も、PMSの一環として論じられるべきものであろうし、最近定められた世界各国の構造設計法に

も、国の施策としてのPMSの導入を前提としたものが多くみられるようになった。

#### 4. アスファルト舗装の構造の力学

##### (1) 多層構造の力学

Boussinesqによる半無限弾性体に発生する応力の解析<sup>15)</sup>は、1930年代から舗装の分野でも利用されてきた。この理論はBurmister<sup>16)~18)</sup>によって展開され、2・3層構造の応力やたわみの解が示されたが、数値計算の結果としては2層構造の表面たわみが示されたのみであった。一方この間、簡易計算法ではあったもののOde-markによって層構造解析<sup>19)</sup>が行われている。

最初に3層構造の計算に成功したのは、Burmisterの解を基礎とした、Fox, Acumらの層構造解析<sup>20)</sup>であった。これも限定された範囲でしか数値化できなかったが、

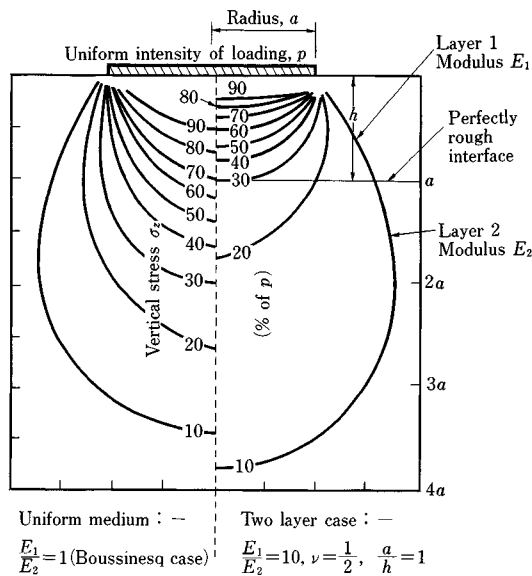


図-1 最初に求められた2層構造の圧力球根<sup>20)</sup>

ここで得られた図-1に示す1層構造・2層構造での圧力球根は、研究者に舗装構造の力学設計について大きな期待を抱かせるものであった。図において左半分は一般的な弾性係数をもつ半無限弾性体、右半分は半無限弾性体の上層を載荷半径に相当する厚みで、10倍の弾性係数をもつ層に置き換えた場合を示している。

最初に電子計算機を用いて広範な計算を行ったのが、Jones, A. ら<sup>21)</sup>で、後にBISTROの名でよばれる多層構造解析プログラム(1968)によって計算され、結果は数表化して公表された。ほぼ同じ時期に多くの解析の結果が相次いで公表された<sup>22),23)</sup>。1972年、BISTROの改良版としてのBISAR(Bitumen Structures Analysis in Roads)が発表され、ほぼ同時期にChevronによる層構造解析プログラムも実用化されている。この2つは今日研究者に最も広く利用されている代表的なプログラム

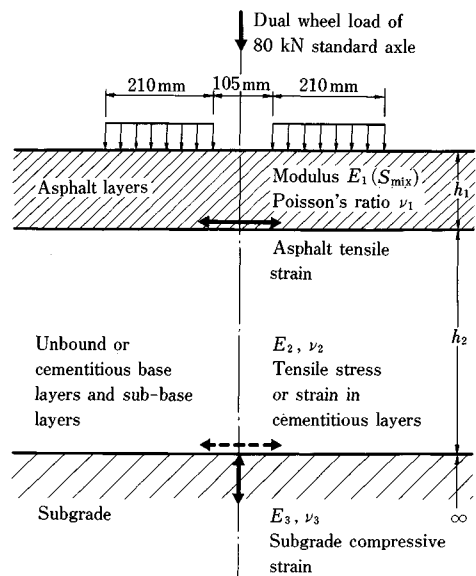


図-2 舗装の構造と設計に用いられる応力ひずみ状態<sup>61)</sup>

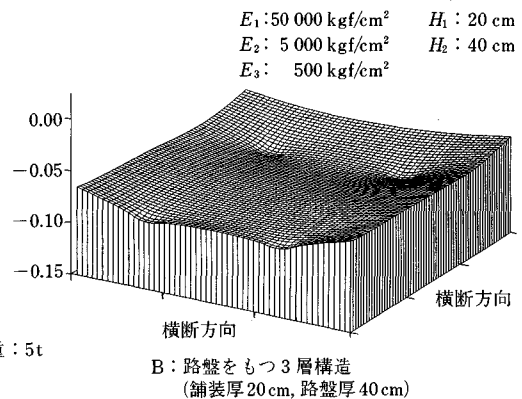
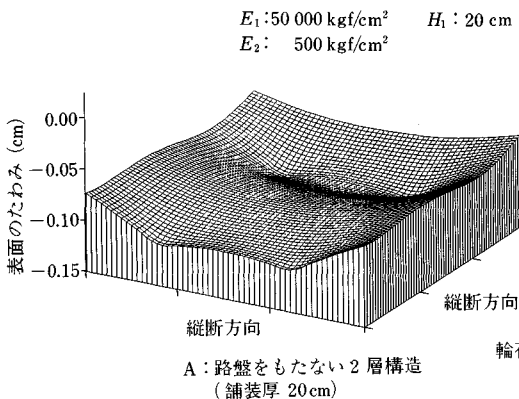


図-3 後輪2軸載荷による舗装表面のたわみの三次元表示の例

である。

1968年には Monismith<sup>24)</sup>らによって有限要素法による層構造解析も行われた。

図—3は BISAR プログラムを用い、SAS を利用して、2層構造と3層構造について、たわみの透視図を描いてみたものである。

## (2) アスファルト舗装構造の力学

このような理論的な解析をもとに、舗装構造の力学を最初に体係づけたのは、第1回の ICSDAP (アスファルト舗装構造設計会議)において発表された Peattie, Baker らの研究で、中でもイギリスの RRL の Whiffin らによる「弾性解法のたわみ性舗装への適用」<sup>25)</sup>と題する論文は、層構造解析の設計への適用の可能性を明瞭に示すものであった。

図—2は力学的にみた舗装体の構造を示すものである。解析の対象となるのは、主としてアスファルト混合物によって構成される層(以下アスファルト層とよぶ)下面に発生する引張りひずみと路床の上面の圧縮ひずみである。

これらの解析が弾性解析であったことを理由に、粘弾性体としての取扱いが必要なアスファルト舗装への適用の可否が論じられた時代もあったが、温度や載荷時間の関数としての変形係数の導入や、路床の支持力を動的変形係数で表現することなどによって、弾性解法の適用がおおむね可能であることが各種の試験からも実証された。

その後、NCHRP (国家協同道路研究計画)における研究の一環として、Hudson らによって、舗装を1つのシステムとして把握し、構造の理論解析、疲労を始めとする材料の特性、維持管理を総合的にとらえた、統括的なプログラム SAMP<sup>26)</sup> (System Analysis Model for Pavement) が構築された。

## (3) 理論解析の用途

これらの理論解析の舗装における主要な用途は、

- a. 舗装構造設計システム、PMS における構造サブシステムとしての利用
- b. 舗装の破壊現象の原因の分析のための利用
- c. Falling Weight Deflectometer, FWD, などと組合せて、舗装の現状の構造的評価
- d. 慣行と異なる材料・構造についての予備的な構造設計、比較設計のための利用
- e. オーバーレイにおける構造の設計 (FWD 等との組合せとして) への利用
- f. 荷重の著しく異なる特殊な舗装の設計への利用
- g. 路床をも含めた材料の試験もしくは研究のための、適切な入力条件の設定、材料の機能評価への利用

などとまとめることができるであろう。

## (4) 今後の課題

ここに述べた連続体としての舗装の力学は、舗装に発生する現象のすべてを説明できるまでに至っていない。たとえば、仮に1本の亀裂が発生したとした場合、この力学の適用はすでに妥当ではない。また破壊の直接の引金とその成長のメカニズムが全く異なる場合も多い。表層で発生し、成長して深部に及ぶ亀裂のメカニズムも、この力学体系での説明は困難である。したがってさらにいくつかのサブシステムを加えることが必要であり、FEM などを利用した今後の体系的な研究の進展が待たれる。

## 5. 舗装に作用する外力

### (1) 概 説

舗装に作用する外力は複雑で、かつては自動車荷重のみを外力として取り扱うのが通常だったが、最近では、気象条件などを一種の外力として取り扱うようになってきた。

### (2) 自動車—タイヤ—舗装の相互作用

#### a) 概 説

わが国は自動車と道路の技術を、相互に無関係に個々の技術として導入した。欧米諸国が舗装や車両の開発にあたって、両者の折り合いをつけてきた苦しい歴史をもつのに対し、日本がそのような歴史をもたなかったのは大きなハンディでもあった。

最近、舗装には、自動車—タイヤ—舗装の相互作用として考えなければならないことが多くなってきたように見受けられる。いわゆる、新たな折り合いをつけることが、舗装設計における最近の重要な課題である。

最近アメリカでは ASTM を中心として、自動車側と舗装側の共催による路面のすべり、タイヤに発生する応力、タイヤ騒音、路面の平坦性などタイヤと舗装の相互作用に関する研究が活発である<sup>26)~28)</sup>。

#### b) 自動車の構造の変化<sup>29), 30)</sup>

最近の世界的な話題は、車の大型化、フルトレーラの普及、後輪トライデム軸車の登場などの軸配置や軸数の変化、タイヤ当たりの荷重やタイヤ空気圧の顕著な上昇、タイヤのワイド化(複輪から単輪への移行)等である。

1980年代に入ってから、世界的に車の構造の変わり方がきわめて顕著で、輸送の合理化、経済化を指向した車両設計思想の変革は、直ちに道路舗装の課題に置き換えられつつある。

わが国の車両の制限を素直に受け取れば、20トン車については軸ごとに4-8-8トン配分になる。しかし最近の大型車では、軸荷重の配分や軸配置はこのように単純ではない。4-10-6配分では、4乗則(後出)を用いて大

まかに計算しても、後者が舗装に与えるダメージは前者の35%増である。

総重量16.5トンの高床式バスは、前軸6.5トン、後軸10トンで設計され、舗装に与えるダメージは、4-8-8車よりも、4-10-6車よりも大きい。

バスの乗車人員一人当たりの重量は、路線バスでは150kg程度だが、超高級バスでは334kgにも及ぶ。20トンの2階建てバスでは260kgで、旅行の高級化指向は舗装にも間接的に影響を及ぼしつつある。これらの自動車側の変化に道路側は、警戒を強めると同時に、その影響について大規模な研究を進めており<sup>35)~37)</sup>、わが国も今後とも車両の大型化について慎重に見守る必要がある。

### c) タイヤ技術の進歩<sup>31),32)</sup>

自動車の変化の背景にはタイヤの性能の著しい向上がある。最近ラジアルタイヤが広く普及し、大きな荷重に耐え、空気圧、接地圧は大きく上昇し、パイアスタイヤを使用したAASHO道路試験時代とは著しく異なる状況にある。近い将来20トン車においてもタイヤ6本の時代になることも予測されている。タイヤと舗装の相互作用として最近注目されているものに、タイヤの“にじり摩擦”とよばれる現象がある。タイヤが接地してたわんだとき、接地部分は収縮して、接地形状は鼓状となり、タイヤが転動した場合、タイヤの収縮力が路面にせん断力として伝達され、これが局部的には路面を引き裂く力となって作用し、その反復によって舗装は表面から疲労破壊を起こすことも考えられる。

## (3) 自動車荷重

### a) 輪荷重・軸荷重

輪荷重の大きさと舗装との関係が最初に取り上げられたのは、アメリカのCoEによる大荷重を対象とした滑走路の設計においてである<sup>33)</sup>。この際は土中のせん断応力が等しくなる深さを計算で求めることで処理され、設計法に導入された。CoEが次いで取り組んだのは、複数の車輪の荷重を単輪としての荷重に換算することで、これは換算輪荷重(ESWL, Equivalent Single Wheel Loads)の名でよばれる。この換算輪荷重についても最初は土中の応力、ついで土中のひずみ、路面のたわみなどから換算され、さらに1層構造から2層構造における換算へと研究が進められた。

当初路面の最大たわみが舗装の破壊を支配すると考えられたが、後に研究の進展につれ、むしろたわみ形状(Deflection Basinの形状)について注目すべきだと考えられるようになった。

後に述べるAASHO道路試験<sup>41),45)</sup>では、荷重の影響を直接評価すべく、舗装のダメージから、各軸の荷重や軸数を標準軸荷重へ換算するEquivalence Factorの名

でよばれる換算係数が求められ、ここで舗装のダメージが荷重の大きさの4乗に比例するとした「4乗則」が成立することが明らかにされた。この換算則については、その後世界各国による検証により、広く追認されることとなった。

その後、この4乗則の理論化に努力が払われ、現在ではかなり高い精度で、換算係数の推定が可能になった。最も試験結果とよい合致を示すのは、アスファルト層の舗装の疲労破壊を対象にした引張りひずみと、舗装全体の変形を対象とした路床上面の垂直ひずみから、各種の換算を行う方法である<sup>34)</sup>。

### b) タイヤの接地圧

舗装構造の力学的な解析の結果によれば、舗装の表面に近い部分での応力は接地圧に支配され、深部では荷重の大きさに支配される。したがって接地圧は舗装構造にとって非常に大きな意味をもっている。また舗装とタイヤの界面の力学状態の解析にもタイヤの空気圧、接地圧が大きな意味をもつ。

AASHO道路試験時代、大型タイヤの空気圧は5.75kg/cm<sup>2</sup>程度であったのに対し、現在のタイヤでは標準で約40%増し<sup>31)</sup>になっている。最近の日本の過積載車両では標準の2倍にも達しているといわれる。

## (4) 交通量

舗装の設計耐用年数は単なる技術課題にとどまらず、社会的な背景、その国の経済状況などとも関係する重要な行政課題であり、将来的には後述するPMSの観点から、道路種別ごとに多様な設計期間の設定が行われることになるであろう。

世界的には一応20年程度を想定する例が多いが、道路によってはもっと短い期間を設定することもあり、交通事情から道路によっては40年設計の必要性も話題になっている。交通量は交通データを舗装設計のために分析し直して、標準軸重(多くの場合18kip, 18000ポンド, 8.2トン, 日本は輪重で5トン)に換算した軸数として取り扱われる。これは車の舗装に与えるダメージの程度を直接設計に反映させようとするものである。

最近では、世界的にみて、設計法の妥当性よりも、むしろ交通量の予測に起因する早期破壊の例が多いといわれ、見方によっては交通量予測こそが設計の最大の課題ともいえる。アメリカは舗装の早期破壊について、AASHO構造設計法の基本的な考え方には誤りはないとしつつも、予期せざる荷重条件の変化<sup>15)</sup>や気象的条件への配慮が重要であることを指摘している。現在進められているSHRP計画でも交通の常時観測、軸重計の設置など、交通条件の把握に力が入られている。

## (5) 重車両対策としての荷重研究

重車両対策は世界的課題であり、交通安全、運輸経済、



表-3 舗装に利用された材料と工法

年代	国名	材料・工法
B.C. -	ローマ	石, 砂利, 碎石その他の地方産材料
	その他	石灰モルタル, 天然ボゾラン
1184	フランス	パリで石のブロック舗装
1669	フランス	碎石を敷く道路が出現
1816	イギリス	マカダム工法実用化
1824	イギリス	ポルトランドセメント発明
1828	イギリス	コンクリートの舗装への利用の研究開始
1830	イギリス	浸透式タール舗装出現
1834	フランス	ロックアスファルトによるマッシュック舗装
1850	アメリカ	板敷き舗装 11 000km を超える
1854	フランス	転圧ロックアスファルト舗装
1858	アメリカ	碎石クラッシャーの登場
1858	フランス	アス舗装の基礎としてコンクリート使用
1863	イギリス	スチームローラの発明
1867	イギリス	タールで混合物を作る工法開始
1876	アメリカ	トリニグッドアスファルトの利用始まる
1800年代末	アメリカ	軟質アスファルト防塵に利用される
1894	アメリカ	石油アスファルトを用いた加熱混合物の利用
1909	アメリカ	ミシガンで本格的なコンクリート舗装始まる

アメリカアスファルト協会, AI, も  $M_r$  をもって路床の変形係数とし, イギリスの設計法では  $M_r$  と同様に取り扱うことのできる Stiffness で変形係数を表現し, CBR も利用できるが, 基本的には動的性状を主とし, CBR を従の立場におこうとしている。

(2) 舗装を構成する材料とその性状

舗装の使用材料の大きな流れとしては, 天然材料から人工材料への転換, 新しい工法の出現, 舗装の普及, 周辺技術特に機械技術の進展による施工の機械化と大量施工に伴う変遷を挙げることができよう。

従来利用されてきた材料としては, 自然土砂(有史以前から), 固結材料としては天然セメント系材料(天然ボゾラン材), 大きささまの形での石材, 丸太・角材・板・木塊等の木材, 天然アスファルト, 石炭から抽出されたタールなど粘結性素材などが挙げられる。ポルトランドセメントや石油精製による石油アスファルトの出現は, 一挙に舗装を普及させるものだった。ここで混合物の力学特性や化学特性が検討されるようになった。

碎石道からアスファルト系混合物を用いた舗装への発展の歴史をとりまとめたものが表-3 である。中に参考として設計法や道路試験の一部を加えた。

AASHO の設計法における材料の Coefficient for Converting SN to Thickness (相対強度指数) の導入は, アスファルト舗装の歴史の中で画期的な出来事といっても良いであろう。

材料の性状は, 路床土からアスファルト混合物に至るまで, それぞれ工学的手法で評価されてきたが, しだいに力学設計に数量的に導入できるような評価方法へと変

遷を遂げ, さらに静的な条件から, 動的な特性として表現する方向, すなわち動的変形係数や疲労特性などで表現する方向へと変化し, 同時に温度や載荷時間の関数としての物理性状の研究も進んだ。このうち代表的なものとしてシェルの stiffness 研究がある。

現在 SHRP 計画のもとで, アスファルトを始めとする, 材料のごく基礎的な性状について, 道路側の研究費負担において, 大学を中心とする研究が大規模に実施されており, すでに多くの貴重な研究成果が公表されつつある。

7. 舗装の設計

(1) 概 説

設計には, 構造の設計のほか, 少し枠を広げて, 材料設計, 安全性, 快適性, 環境, 経済性評価までを含める必要がある。

a) 力学的な構造の設計

舗装は他の構造物と異なり修復もしくは置き換えが容易で, その破壊が交通にとって決定的な障害を与えるものではないことや経済性などの理由で, ほとんど安全率をとらない構造物である。これは材料の疲労限界以上の応力やひずみで利用されていることを意味しており, したがって本質的には舗装設計はあらかじめ耐用年数を設定した疲労設計という設計手法に属している。

力学的な設計としては, 亀裂破壊への対応と変形への対応の2つに分けられる。最近の対亀裂設計は, 疲労破壊と対温度応力破壊の2つを対象にしたものである。

変形については表層の材料の流動に伴う変形と, 路床変形に起因する構造的変形の2つに分けられるが, ここでも先に述べた多層構造解析は有効である。

b) 材料の評価と設計

材料の評価と配合などの設計も含まれる。

c) 安全性, 快適性, 環境への対応

すべり抵抗, 視認性が重要であり, 環境の中には騒音, 振動, 景観, 美観等の力学的な機能以外の機能に対応する設計が含まれ, 今後その重要性を増すと予測される。

(2) 設計法研究のための道路試験

舗装の設計法の確立を目指して世界中で多くの道路試験が行われてきた。ここでは特に設計法への寄与の大きかった代表的な道路試験について述べておく。

a) アメリカの初期の道路試験<sup>6)</sup>

アメリカは1918年の The Arlington Road Test (煉瓦, アスファルト, コンクリートなど広範な材料についての道路試験), 1920年の Bates Experimental Road (コンクリート舗装で著名) から, AASHO 道路試験に至るまで, 数次にわたって大規模な道路試験を実施し, それ



ぞれ時代に対応した設計指針を求めてきた。

b) CoE の滑走路設計のための試験<sup>33)</sup>

後に詳述する CBR 設計法の決定のために、CoE はカリフォルニア州道路局の協力のもとに、1942 年頃、B-24、B-29 などの実際の爆撃機までを利用した滑走路舗装の試験を実施した。この試験は、道路を基準にして作成された CBR 曲線を、計算によって大荷重にまで拡大させて、大荷重用設計曲線を作成し、それを検証するものだった。一連の研究は第 2 次大戦終了後も長期間継続的に行われた。

c) WASHO の道路試験<sup>41), 42)</sup>

1951 年に計画された道路試験で、アメリカの西部各州の共同研究として実施された。必要とする舗装厚は路床の CBR によって一義的に定まるとする CBR 設計法のもとでは、アスファルト層の動きは直接設計に反映されなかったが、この層の効果の検証、CBR 設計法の交通量に関する検証も課題であった。アイダホ州で 2 つの試験走行路（ループ）が準備された。舗装の構造は、2 in. のアスファルト層と 4 in. の砕石上層路盤の組合せと、4 in. のアスファルト層と 2 in. の砕石上層路盤の組合せに大別され、それぞれについて下層路盤厚が変えられた。軸重は 18 および 22 kips のシングル軸、32 および 40 kips のタンデム軸の合計 4 種、荷重ごとに 1 本の走路が割り当てられた。試験走行の回数は 119 000 回、約 24 万軸であった。1954 年 5 月に試験走行を終了、1954、1955 年に研究成果が取りまとめられた。

この試験の結果、舗装の破壊が急激なのは春先の融解期であること、厚いアスファルト層をもつ舗装は破壊への抵抗性が大きいことや、シングルとタンデムの換算などが明らかにされ、単なる厚みだけではなく、舗装の材質の評価が重要なことを示唆したこの試験の意味は大きかった。

なお試験終了後、この試験で使用された材料が各州へ送られ、参加 19 州によって、各州の設計法を用いて構造設計法の比較<sup>43)</sup>が行われた。ちなみにわが国の最初的高速道路である名神高速道路の舗装の設計は、おおむねこの道路試験の結果に準拠していた。

d) AASHO の道路試験<sup>1), 2), 44), 45)</sup>

AASHO 道路試験は、イリノイ州の高速道路予定地に作られた、大小 6 個のループで行われた。WASHO 道路試験の成果を踏まえ、設計法の構築を目指して綿密な計画が練られ、参加した研究者は合理的設計法の確立に意欲を燃やした。これは同時に毎年 3 000 km を上回る高速道路を建設したアメリカの「黄金の 1960 年代」の幕開けを意味するものだった。

この道路試験の結果は、全 8 冊としてまとめられ、この観測資料は今日でも各種の解析に世界的に広く利用さ

れている。この研究についてはすでに多くの紹介があるのでここでは省略し、後に設計法の項で若干触れる。

この試験は限定された気象、路床条件で行われたため、その後全米各州で NCHRP のもとで、サテライト道路試験が数多く実施された。これらの成果は設計法のその後の改訂に生かされている。

e) SHRP の道路試験<sup>46), 53)</sup>

現在アメリカは国家計画としての SHRP 計画のもとで、世界に広く呼び掛け、道路のパフォーマンス研究を、実施もしくは計画しており、国内だけで試験道路の総数は 900 か所にのぼるとされている<sup>53)</sup>。

f) イギリスの道路試験<sup>47)</sup>

世界の現行設計法に寄与した代表的なものの 1 つとして、イギリスにおける 1949 年開始の Boroughbridge の道路試験、1957 年から開始された Alconbury Hill の道路試験などがある。これらは幹線道路で一般交通を許しながらの長期にわたる研究であったことに特徴がある。Alconbury Hill では、一区間を 60 m とし、33 区間が設けられ、もっぱら構造設計を目指して、長期間観測が行われたことで有名である。後に述べるイギリスの新設計法には、この道路試験の結果が大幅に利用されており、シェル石油、アメリカのアスファルト協会の設計法にもこの道路試験の結果が多く取り入れられている。

一方ヨーロッパ諸国でも連携して道路試験が実施されて<sup>48)</sup>おり、OECD のもとに、1984 年にはイタリアで参加 10 か国で、アスファルト舗装の応力測定の研究が行われた。

## 8. 構造設計法の変遷

設計法進展の世界の大きな流れは、プレ CBR 設計法時代、CBR 設計法時代、AASHO 設計法時代、改訂 AASHO 設計法時代の 4 つに集約できるであろう。最近にあってはこれらに加え、理論的設計法の提案、PMS 概念の導入も見逃すことのできない動きである。

遅々とした進展しかみせなかったアスファルト舗装設計法に比し、コンクリート舗装においては、1927 年に Westergaad によって解が示された、弾性支承上の版としての解析をもとに、多くの人によって理論的な設計法が提案され、1951 年には Portland Cement Association, PCA、の設計法が誕生した。この両者の時間的なずれは、アスファルト系材料の複雑な力学性状を取り込むことのできる力学体系が存在しなかったためであった。

これらの設計法のうち主要なものを以下に述べるが、これを一言にしていえば、舗装の構造設計の歴史は、長い手探りと経験の時代を経て、力学的な体系に組み込みにくい複雑な要因を、いかに設計へ取り込むかについて

の研究の歴史であり、経験設計からメカニシチック (mechanistic) な設計への道程であったといえるであろう。

(1) CBR 法時代以前の設計法

1700 年後半、フランスの道路総監の地位にあったトレサゲは、交通量に応じて碎石の層の厚みを変え、さらに基礎の排水を重視するなど、道路に構造設計の概念を導入し、さらに定期的な維持体制を整備するなど、の功績を残して近代道路工学の父とされる。その後、テルフォード、マカダムが彼の偉業を継ぐことになった<sup>9)</sup>。

1900 年以降、幾多の提案があったものの、設計法として具体的なものはなく、経験と道路試験の結果をもとに舗装が作られた<sup>6)</sup>。しかしこの時代にたくさんの舗装工法が誕生したことは特筆すべきことだった。

(2) CBR 法の誕生とその時代の各種の設計法

1928 年から 1929 年にかけて、カリフォルニア州道路局が行った舗装の調査、ならびに路床と舗装を構成する材料への CBR 試験の適用<sup>33)</sup>は、構造設計の原点ともいえるべきものであった。膨大な道路調査によって、路床から路盤に至る各層の CBR 値と舗装の供用性との関係が求められた。

1939 年第 2 次世界大戦の勃発に伴い、CoE は急きよ飛行場の滑走路の設計法を開発する必要に迫られ、1940 年 11 月設計法の開発研究を開始した。アスファルト舗装に関しては既存の方法に適切なものを見出すことができず、各種の設計法について調査が行われ、広範な検討の結果、暫定的に CBR 法を利用して研究を開始することが決定された。

道路での調査結果が分析され、1929 年時点の調査結果と 1942 年時点の結果から得られた図-4 に示す 2 本の設計曲線が作成された。この 2 本の設計曲線は道路舗装にとってまさに記念碑的な存在である<sup>49)</sup>。CoE は、1929 年調査結果 (B 曲線) には 4 kip 輪荷重を与え、1942 年調査結果 (A 曲線) には 7 kip 輪荷重を与えた。それ以上の荷重に対しては、土中応力を計算することに

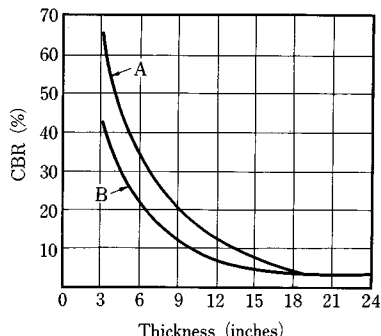


図-4 最初に作られた CBR 曲線<sup>38)</sup>

よって外挿法で曲線を求めることにし、当初作成された CBR 曲線は輪荷重、4, 7, 12, 25, 40, 70 kip に対応する暫定設計曲線であった。先に述べた実大規模の試験での検証を経て空港用の CBR 設計曲線が作成<sup>49)</sup>された。

この設計方式は戦後アメリカの各州や世界の各国によって道路用に採用され、一世を風靡する設計法となった。

ちなみに、わが国の舗装要綱が CBR 設計法を取り入れたのは 1961 年であった。

なおこの時代には CBR 法以外に、土質分類による方法、K-値による方法、3 軸試験による方法等さまざまなものがあるが、多くは路床土や材料の評価法の差であり、CBR 法と基本的に異なるものではなかった。アメリカでは現在も州によっては依然としてこの設計法に基づいて設計を行っている州もある。

(3) AASHTO 設計法の誕生とそれにかかわる研究

a) AASHTO 設計法の誕生とその変遷<sup>50)</sup>

AASHTO の道路試験結果の分析に基づいて得られた設計法は、1961 年「The AASHTO Interim Guides for Design of Rigid and Flexible pavements」として刊行された。

1962 年第 1 回アスファルト舗装構造設計会議 (ICSDAP) が開催され、AASHTO 道路試験結果のお披露目と AASHTO 設計法の紹介が行われた。この設計法はあくまで経験法であり、1972 年、1981 年 (コンクリート舗装のみ)、1986 年の改訂を経て、今日に至るまでアメリカの多くの州 (35 州) や日本を始めとする世界各国でその成果が広く利用されている。

この設計法の特徴は次に要約されよう。

- a. 舗装の Present Serviceability Index, PSI, (サービス指数) 概念の導入
- b. 舗装を破壊する度合は荷重の 4 乗に比例するとした「4 乗則」による標準軸重への軸重の換算
- c. 材料の相対強度指数の導入 (強い材料の層では厚みの軽減が可能)
- d. Regional Factor (地域係数) の導入

表面に現われていないものの、これは合理的設計法 (Rational Design) への指向を強めた設計法であった。ちなみに、AASHTO の材料の相対強度の考えが、わが国の舗装要綱に導入されたのは 1967 年であった。

b) 設計法改訂のための検討<sup>21), 51)</sup>

1962 年アメリカは NCHRP を発足させ、道路全般にわたる新たな研究組織の構築を図った。舗装の分野では AASHTO 設計法を、広範囲にわたって評価し、これを利用するための理論的な基礎を作ることが目標とされた。これらの研究の要点は、

- a. 交通量を考慮に入れた Regional Factor の決定

- b: 気象の異なる地域、交通条件に對してのサマライ卜道路試験
- e: 試験結果の理論的解析と層構造解析結果との照合
- d: 路床支持力の合理的表現法の研究
- e: 排水条件の評価
- f: 構成材料における理論解析での弾性係數に相当する性状の合理的表現法と、材料の疲労抵抗性の研究

であった:

1961年の Interim Guide は數年の運用と經驗をもとに、1972年改訂され、1981年にはヨシタリト舗裝に關する部分に若干の改訂が加えられた: さらに1972年以降の研究成果をもとに1986年4月には夫改訂が行われた:

- e) アメリカの設計法研究の手順
- アメリカの設計法研究の流れをまとめると、
- a: 各時点での技術や學問研究の現状集約
- b: 實際規模の道路試験によるパフォーマンス評価
- e: 試験結果の普遍化を目指した広範囲にわたる検証
- d: 最適化による設計法の策定
- e: 結果の理論解析と法則性の発見
- f: 今後必要とする研究項目の集約

という作業が反復され今日に及んでいる:

### 9: 現行の代表的な設計法

#### (1) 概 説

世界各國の設計法については、參考文獻<sup>3)</sup>に詳しい: ここではそれらのうち特に重要と思われるもの、特徴的なものについて述べておきたい: これらの現行設計法に

共通しているのは、理論と經驗との融合を目指したものであるといえるであろう:

さまざまな考え方、またさまざまな気象条件、交通条件のもとにあつても、ヨニロツパ諸國の個々の設計法に共通の入力を与えれば、驚くほど合致した舗裝構造が得られることが OECD 道路研究グループによつて報告されている<sup>3)</sup>: この事實は各國の設計法が非常に精度を高めていゝことを示すものと受け止められる:

以下に述べる設計法における設計条件や共通事項の一覽を整理して表—4 に示す:

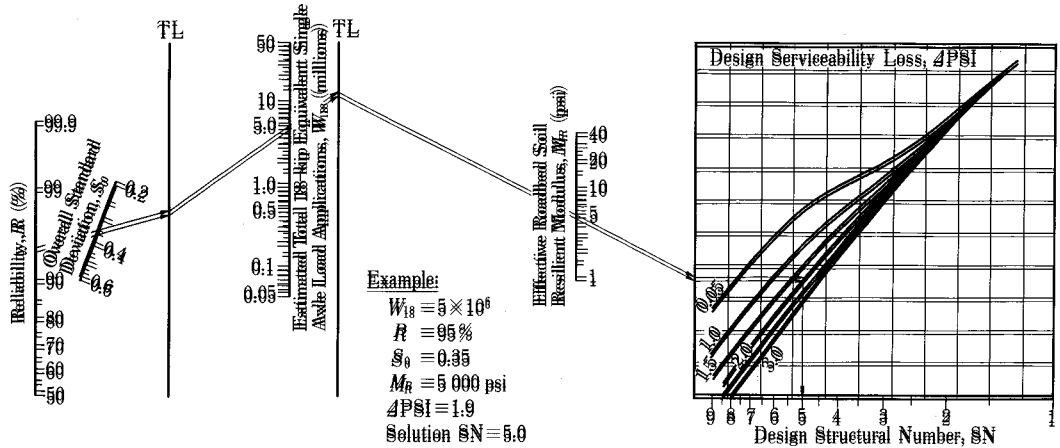
#### (2) 現行 AASHTO 設計法<sup>5), 5)</sup>

1986年の主要な改訂事項は以下のとおりであり、AASHTO はこれをドラフスシツタな改訂と位置付けている:

- a: Reliability Factor,  $R$ ; (信頼係數) を導入し、また条件次第で、耐用年限の短い小さな舗裝厚の設計も可能なようにした:
- b: それまで利用しできた Soil Support Value を季節変動を考慮した  $M_r$  に置き換えた: これは将来の、より mechanistic (機械的あるいは力学的) な設計法を目指しての第一歩である:
- e: さらに Drainage Factor (排水指數) を導入し、排水条件のよいところでは舗裝厚を減少させることができるようにした: 同時に排水に關する項目を指針に含めた:
- d: 實際の舗裝における構造強度の評価や舗裝構造の解析に基づいた、オニバニレイ厚の計算法を加えた:
- e: 大きな軸荷重、多軸車両に對しての Load

表—4 各種の舗裝設計法の設計条件

項 目	AASHTO	イギリス	Shell	Asphalt Institute
制定、発表年	1986	1986	1978	1983
設計法の分類	經驗法を理論法で補強	經驗法を理論法で補強	理論法を經驗法で補強	理論法を經驗法で補強
想定する耐用限界	所要の PSI	わだち部の龜裂の兆候、10mm わだち掘れ	設計者の要求するわだち深さ、設計交通量で龜裂は発生しない	面積で20%のひびわれわだち深さ、13mm
交通量の取扱い	18kip換算累積軸數	18kip換算累積軸數	18kip換算累積軸數	18kip換算累積軸數
最大交通量	$5 \times 10^7$ 軸	$2 \times 10^8$ 軸	$10^8$ 軸	$5 \times 10^7$ 軸
路床評価の基本	$M_r$ ; 他で代替可	Stiffness, CBR で代替可	弾性係數; 他で代替可	基本は $M_r$ ; 代替可
解析する応力状態	含みとして、路床上面の圧縮ひずみと下層下面の引張りひずみ	路床上面の圧縮ひずみと下層下面の引張りひずみを考慮	路床上面の圧縮ひずみと下層下面の引張りひずみで設計	路床上面の圧縮ひずみと下層下面の引張りひずみで設計
温度の取扱い	特になし	特になし	年平均大氣温度、下層混合物の變形係數を導入	年平均大氣温度、下層混合物の變形係數を導入
材料の疲労抵抗の組み込み方	道路試験結果による	道路試験結果による (疲労曲線も考慮)	材料の疲労曲線を導入	材料の疲労曲線を導入
設計厚の求め方	設計手ヤートと計算式	設計手ヤート	設計手ヤート	設計手ヤート



図一5 AASHOの舗装構造設計チャート<sup>56)</sup>

Equivalence Factorを追加した。

f. Life Cycle CostならびにPMSの項を追加した。

g. 理論的設計法についての将来展望を記述した。

図一5は現行の設計チャートを示したものである。このチャートはStructural Number, SN(構造厚指数)を求めるもので、材料の相対強度指数や排水係数などから層の構成を求める。

その後も1990年を目標に改訂作業が進められており、 $M_R$ の試験法なども含め、機械的設計法に関する研究成果の反映、舗装のリハビリテーションの設計手法の見直しなどが含まれる予定である。

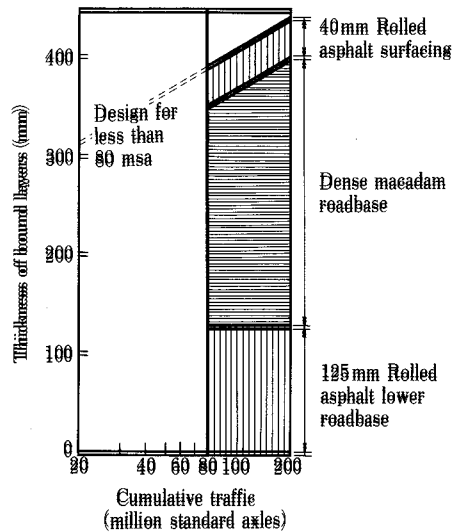
(3) イギリス法

1970年のRoad Note 29の第3版<sup>51)</sup>(初版1960年、第2版1965年)はAlebury Hillにおける試験道路と、AASHO道路試験の結果を利用して作成されて、その後も研究が進められてきた。

1970年頃から特定の高速道路や幹線道路の交通量は予想しないほど増大し、舗装の破壊が進行し、新たな設計法が必要になった。新しい設計法についてはそれまで積み残された144試験区間に及ぶ道路試験の結果を取り込むこと、進展の大きい理論解析結果を利用すること、TRRLとNottingham大学の協同研究の成果を取り込むことが課題とされた。その結果Noteの改訂としてではなく、研究論文の形で新設計法が提案された<sup>58)</sup>、政府はこの論文を承けて、1986年に国の標準設計法<sup>56), 57)</sup>として暫定的にこの提案を採用することにし、今目に及んでいる。

Nottingham大学はすでに独自に理論的設計法を提案していたが<sup>58)</sup>、新設計法はこれらの研究成果も取り込んだものになった。

この設計法の特徴は、可能な限り理論的設計法を主軸



図一6 イギリスの重交通用設計曲線<sup>56)</sup>

とした考え方で統一しようとしていること、新しい工法、材料に対応できる方法とすることなどである。

新しい方法の要点は、

- 設計寿命に、舗装の破壊のかわりに臨界状態の考えを導入したこと、臨界状態として表層の流動を除いた、構造的なわだち深さとして10mm、わだち部の亀裂の発生とした。この段階でオーバーレイ等を行うことによって全面的な改築を避ける意味をもつ。
- 設計は、アスファルト層下面の引張りひずみによる疲労破壊、路床上面のひずみの双方を対象とする。
- 路床から下層路盤までと、上層路盤から表層までをそれぞれ独立させて設計する(アスファルト層下面に作用する応力を限界内にとどめるため)。

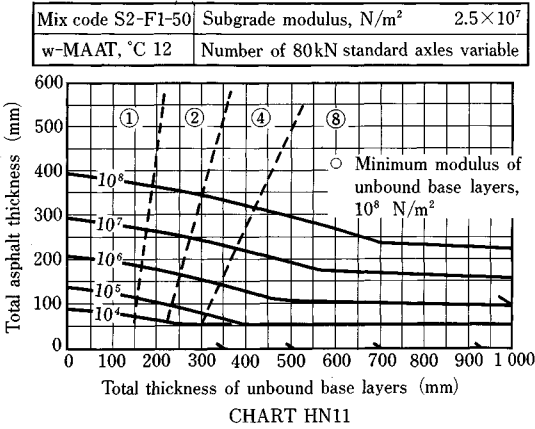


図-7 シェル設計法のチャートの例<sup>60)</sup>

- d. 路床と下層路盤の間にキャッピング層と称する施工機械の走行への対応を考慮した層を作る。
- e. 路床土の評価に動的な変形係数としてのスティフネスの概念を導入した。
- f. パフォーマンスの変動性を舗装の残存確率として考慮に入れた。
- g. 構成材料の強度、路床の強度、交通量などの変動や不確実性を考慮する。
- h. コスト概念を明確にし、PMS 的な考えを可能な限り設計法に取り込もうとした。

などに集約できよう。

図-6はこの設計法の考え方を端的に示すものである。すなわち図は8000万軸の交通を対象に設計する場合、アスファルト層の最下層に、中間の層に用いる材料より疲労抵抗性の高い材料を用いる構造を定めている。これは在来の構造設計には全くなかった新しい考えである。

(4) シェル石油による方法<sup>59), 60)</sup>

シェル石油の研究者は、舗装の力学分野で、層構造解析から設計法の開発までも取り上げ、世界各国の設計法の進展に大きく貢献してきた。

理論的解析と並行して、世界の代表的な道路試験に独自の測定機器を持ち込んで観測を行い、独自の解析を進め、それらの集大成として1978年設計法を提案した。したがってこれは単なる理論設計法ではなく、各国の道路試験の結果を十分に取込んだものになっている。

ここでアスファルトのスティフネス概念を利用したことは、取扱いが困難であった温度の取扱いを容易にした。図-7は設計チャートの一例を示す。曲線勾配の急な部分は舗装の変形によって決まる領域であり、緩い部分はアスファルト層の疲労によって定まる領域である。

(5) Asphalt Institute (AI) の方法<sup>61)</sup>

アメリカのアスファルト協会は、1955年以降設計法

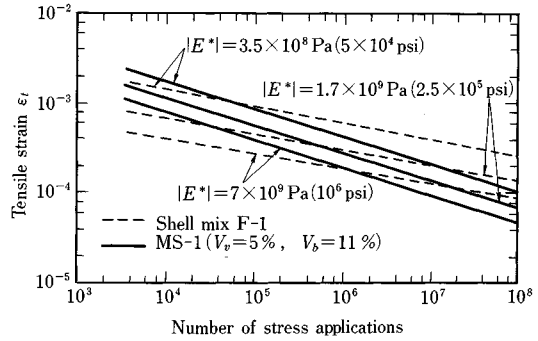


図-8 設計に利用されたアスファルト層下面の疲労破壊を考慮した引張り応力の限界<sup>62)</sup>

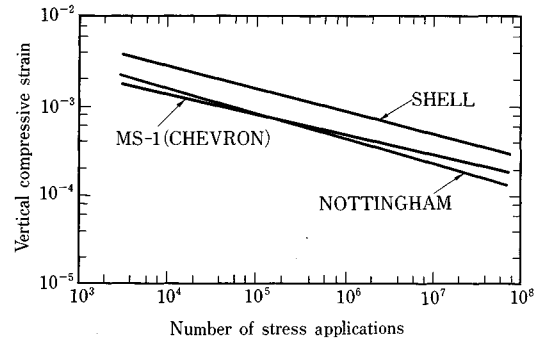


図-9 設計に利用された繰返し載荷を考慮した路床上面における圧縮ひずみの限界<sup>62)</sup>

マニュアルを刊行し、1963年にはWASHO, AASHO, イギリスの道路試験の結果を承けて、Thickness Design Manual (MS-1) を刊行した。1983年の9版は従来の考え方を一新して、層構造理論解析を主軸に据えた。この設計法は実質的にはMonismithらアメリカの代表的な学者・研究者が開発に当たった革新的なものであり、同時にDAMAと名づけられたコンピュータプログラムが準備された。これは直接設計手順としてのプログラムではなく、与えられた断面について、計算上舗装の挙動を追跡する方法を取っている。常温施工のアスファルト乳剤工法の設計法も含まれているのが特徴の1つに挙げられる。

図-8はアスファルト層下面の引張りひずみの、設計交通量に対応した限界値を示し、また図-9は同じくこの設計法に用いられた対変形設計における、路床上面の限界圧縮ひずみを示す。この手法はシェル法、イギリス法でも全く同じである。

(6) その他の設計法の提案

以上述べたほか、世界各国で多くの半理論的設計法が提案されている。そのほとんどすべてがアスファルト層の疲労破壊と変形を供用限界と定義した設計になっている。

## 10. 安全性、環境などを対象にした設計

今後交通機能以外の各種の機能に対応したきめ細かな設計が求められるようになると思われる。

### (1) 路面の設計

路面性状は、歩きやすさ、乗り心地、排水性、快適性、安全性に影響を与え、すべり抵抗、振動、騒音等に大きな関係をもち、路面にも設計の概念の導入が必要と思われる。このためにはタイヤと路面の接触や相互作用の力学の研究や、路面粗さなどの表面の性状、摩擦や潤滑など摩擦についての力学的な検討、他の学問分野との幅広い提携も必要であろう。

### (2) 環境設計

舗装の環境設計としては、美観や安全面からの色彩設計、路面のパターン設計、自然もしくは都市景観との調和などが挙げられ、人間の感性との接点をどのように求めていくかが研究課題である。

## 11. 舗装の評価

舗装の評価は大別して路面性状の評価と構造強度の評価になる。前者は主としてユーザーへのサービスの観点に立つものであり、管理者側からは管理基準として有用である。後者はもっぱら管理者側にとって必要である。いずれも PMS に不可欠の要素であり、今後研究の重要性が高まっていくものである。

### (1) 路面性状の評価

路面性状の評価について AASHO は PSI という画期的概念を採用した。AASHO はそのために、平坦性（縦断方向および横断方向の2種）、亀裂、補修面積の3つを要素として取り上げた。判定者の主観に基づくデータ（Present Serviceability Rating, PSR）を解析し、客観的な評価を可能にした。この概念も世界の多くの国の受け入れられるところになり、実状に応じて修正が施され広く利用されている。この研究は PMS との関係において、世界中できわめて活発で、測定機器も日進月歩の状況にあり、SHRP 計画でも大きく取り上げられている。

### (2) 構造強度の評価

路面のたわみから構造を評価すべく開発された Benkelmann Beam は、この研究の先駆けをなした。次いで走行式たわみ測定装置が各国で開発されたが、研究主体の利用が多かった。これに対してアメリカでは AASHO 道路試験の追試のためのサテライト研究計画の中で、Road Rater, Dynaflect などが開発された。一方ヨーロッパでは、路面たわみを測定する落錘方式の Falling Weight Deflectometer の開発が行われた<sup>62)</sup>。これは実際に5トン輪荷重に相当する荷重を作用させることができ、急速に普及しつつある層構造解析との組合せによ

て、舗装の深部や路床のさまざまな評価が可能であり、今後大きな研究手段になると期待されている。空港用には10トン、20トンの機器もあり、将来の構造評価用機器の主力とみなされている。

### (3) 路面評価と構造評価の統合

路面性状を時系列的に眺めることにより、舗装の構造を評価することも可能だが、構造の適否を直接判断するには困難がある。舗装の設計条件である供用限界の設定にあたっては、両者の力学的統合が不可欠である。

## 12. 将来の問題

### a) PMS への取り込みを前提とした設計法

設計法研究は、今後 PMS との関連において発展を遂げていくと思われ、PMS の普及を前提とした設計法への色彩を強めることになろう。

### b) 資源の節約

省資源工法の開発、資源の再利用・有効利用に向けた舗装工法の開発が今後急速に進展していくであろう。

アスファルト混合物のリサイクルにとどまらず、路盤材その他のリサイクルが課題になり、リサイクルを前提とした材料の利用や設計法が求められよう。

### c) 地球環境問題との関係

ごく近い将来、舗装にも環境問題に配慮した設計や工法開発が要求されるであろう。常温施工混合物を大幅に利用した舗装も話題になると思われる。

### d) 世界情勢とのかわり

ヨーロッパでは1992年末の欧州共同体の市場統合へ向けての道路の設計条件の統一や、舗装に関する共同研究がさらに進むものとみられている。また開発途上国への技術援助、東欧圏諸国への技術支援などが具体的な課題になるとみられている。

## 13. おわりに

アスファルト舗装の設計法の動向について、歴史的な考察を加えてみた。紙面の都合もあり、十分意を尽くすことはできなかったが、舗装技術の将来の発展に役に立つならば、著者の望外の幸せである。図-3の作成には上島 壮氏のご協力を頂いた。この報告を草するにあたり、多くの方々の意見を頂き、また討議に加わって頂いたことに厚く感謝の意を表したい。

### 全体的な参考文献

- 1) Proc. of 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements (ICSDAP), 1962, 1967, 1972, 1977, 1982, 1987.
- 2) NCHRP Report など HRB, TRB 刊行論文ないし報告.
- 3) ASTM 刊行 Special Technical Paper.
- 4) OECD, Road, Road Transport Research Group 報告書.

- 5) Proceedings ASCE, Proceedings AAPT.
  - 6) US Department of Transportation, Federal Highway Administration: America's Highways 1776/1976, A History of the Federal-Aid Program, 1976.
- 参 考 文 献
- 7) Gregory, J. W. : The Story of the Road, Alexander Maclehouse & Co., 1931.
  - 8) O'Flaherty, C. A. : Highways, pp.1~22, Edward Arnold (Publishers) Ltd. London, 1967.
  - 9) Hudson, W. R. and McCulloch, B. F. : Flexible pavement design and management, systems formulation, NCHRP Report 139, HRB, 1973.
  - 10) Haas, R. and Hudson, W. R. : Pavement Management Systems, Robert Krieger Publishing Co., 1978.
  - 11) AASHTO : Guidelines on Pavement Management, 1985.
  - 12) Massueco, J. : Future federal pavement policy, Engineering 21st Century Highways, Proc. of a Conference, ASCE, pp.26~34, 1989.
  - 13) OECD : Pavement Management System, Road Transport Research, OECD, 1987.
  - 14) The World Bank : The Highway Design and Maintenance Standard Series, 1987.
  - 15) Boussinesq, V. J. : Application des potentiels a l'étude de l'équilibre, et du mouvement des solides avec des notes étendues sur divers points de physique, mathématique et d'analyse, Paris, 1885. (Gauthier-Villais)
  - 16) Burmister, D. M. : The theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways, Proc. HRB, Vol. 23, pp.126~148, 1943.
  - 17) Burmister, D. M. : The general theory of stresses and displacements in layered soil systems, Journal of Applied Physics, Vol. 16, 16 : 2, pp.89~96; 16 : 3, pp.126~127; 16 : 5, pp.296~302, 1945.
  - 18) Burmister, D. M. : Evaluation of pavement systems of the WASHO Road Test by layered systems method, HRB Bulletin 177, pp.26~54, 1958.
  - 19) Odemark, N. : Investigation as to the elastic properties of soils and design of pavements according to the theory of elasticity, Meddelande No. 77, Vaginstutute, 1949.
  - 20) Acum, W. E. A. and Fox, L. : Computation of load stresses in a three-layer elastic system, Geotechnique, Vol. 2, pp.293~300, 1951.
  - 21) Jones, A. : Tables of stresses three-layer elastic systems, HRB Bulletin 342, pp.176~214, 1962.
  - 22) Ahlvin, R. G. *et al.* : Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space, HRB Bulletin 342, pp.1~13, 1962.
  - 23) Peattie, K. R. : Stress and strain factors for three-layer elastic systems, HRB Bulletin 342, pp.215~253, 1962.
  - 24) Duncan, J. M. *et al.* : Finite element analyses of pavements, HRB Record, No. 228, pp.18~33, 1968.
  - 25) Whiffin, A. C. *et al.* : The Application of elastic theory to flexible Pavements, Proc. ICSDAP, pp.499~521, 1962.
  - 26) ASTM : Pavement Surface Characteristics and Materials, Symposium of ASTM, STP 763, 1980, 7 papers.
  - 27) ASTM : Frictional Interaction of Tire and Pavement, Symposium of ASTM, STP 793, 1981, 15 papers.
  - 28) ASTM : The Tire Pavement Interface, Symposium of ASTM, STP 929, 1985, 11 papers.
  - 29) 自動車技術会 : 自動車諸元表.
  - 30) INUFA Katalog, 1989 (International Catalog of Commercial Vehicles).
  - 31) 日本自動車タイヤ協会 : JATMA Year Book, タイヤ協会規格, 1989.
  - 32) 酒井秀男 : タイヤ工学, グラシブリー出版.
  - 33) ASCE : Development of C. B. R. Flexible Pavement Design Method for Airfields, (A Symposium) Trans. ASCE, Vol.115, pp.453~589, 1950, 11 papers.
  - 34) Deacon, J. A. : Load equivalency in flexible pavements, Proc. AAPT, Vol. 38, pp.465~494, 1969.
  - 35) TRB : Twin Trailer Trucks, Special Report 211, TRB, 1986.
  - 36) OECD : Heavy Trucks, Climate and Pavement Damage, Road Transport Research, OECD, 1988.
  - 37) OECD : Impact of Heavy Freight Vehicles, Road Research, OECD, 1983.
  - 38) Porter, O. J. : Development of the original method for highway design, Trans. ASCE, Vol. 115, pp.461~467, 1950.
  - 39) Hveem, F. N. *et al.* : The effect of resilient-deflection relationship on the structural design of asphaltic pavements, Proc. ICSDAP, pp.649~666, 1962.
  - 40) Heukelom, W. and Klomp, A. J. G. : Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction, Proc. ICSDAP, pp.667~679, 1962.
  - 41) HRB : The WASHO Road Test, Part 1 : Design, Construction and Testing Procedures, HRB Special Report 18, 1954.
  - 42) HRB : The WASHO Road Test, Part 2 : Test Data, Analysis, and Findings, HRB Special Report 22, 1955.
  - 43) HRB : Flexible pavement design correlation study, HRB Bulletin 133, pp.1~38, 1956.
  - 44) HRB : The AASHO Road Test, Proc. Conference Held May 16-18, 1962. HRB Special Report 73, 1962.
  - 45) HRB : The AASHO Road Test, HRB Special Report 61A-61G, 1961-1962.
  - 46) TRB : America's Highways, TRB Special Report 202, 1984.
  - 47) Croney, D. C. : The Design and Performance of Road Pavements, HMSO, 1977.
  - 48) OECD : Full-Scale Pavement Tests, Road Transport Research, OECD, 1985.
  - 49) Corps of Engineers : Engineerings and Design-Flexible Pavements, EM-1110-345-302, 1958.
  - 50) AASHTO : The AASHTO Interim Guides for Design of

- Rigid and Flexible Pavement, AASHO, 1961, 1972, 1981, 1986.
- 51) Til, C. J. V. *et al.* : Evaluation of AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structures, NCHRP Report 128, 1972.
- 52) アスファルト, No. 155, 日本アスファルト協会.
- 53) Foryth, R. A. : AASHO design concepts, Engineering 21st Century Highways, Proc. of a Conference, ASCE, pp. 20~25, 1989.
- 54) Department of the Environment, Road Research Laboratory, Road Note 29, HMSO, 1970.
- 55) Lister, N. W. *et al.* : Design practice for bituminous pavements in the United Kingdom, Proc. 6th ICSDAP, pp. 220~231, 1987.
- 56) Department of Environment (UK) : Structural Design of New Road Pavements (Draft), Design Standard HD XX/86, 1986.
- 57) Department of Environment (UK) : Structural Design of New Road Pavements (Draft), Advice Note HD XX/86, 1986.
- 58) Brown, S. F. *et al.* : An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavement, Nottingham, The Department of Civil Engineering, University of Nottingham, (2nd edition), 1985.
- 59) Shell International Petroleum Co. Ltd. : Shell Pavement Design Manual-Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic, 1978.
- 60) Gerritsen, A. H. *et al.* : Seven years' experience with the structural aspects of the Shell Pavement Design Manual, Proc. 6th ICSDAP, pp. 94~106, 1987.
- 61) Asphalt Institute (USA) : Thickness Design-Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets (MS-1), Ninth Edition, 1983.
- 62) Asphalt Institute (USA), Computer Program DAMA, User's Manual, 1983.
- 63) Claessen, A. I. M. *et al.* : Pavement evaluation with the falling weight deflectometer, Proc. AAPT, Vol. 45, pp. 122~157, 1976.

(1990. 7. 9 : 受付)