

# アスファルト

第35巻 第175号 平成5年4月発行

## 175

### 特集・フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ (FWD) について

特集にあたって	安崎 裕	1
FWDのメカニズム	伊藤保彦・福原敏彦	2
FWDによる舗装の診断	姫野賢治・井上武美	9
FWDによるたわみ測定の実際	雑賀義夫	21
FWDによる舗装診断の実例	丸山暉彦	28
FWDによる舗装診断の実例 ～空港舗装への適用～	八谷好高	30
FWDの今後の展望	笠原 篤	34
FWDの使用の現状と今後の方向について	中村俊行	38

<アスファルト舗装技術研究グループ・第15回報告>

### 「第7回・アスファルト舗装に関する国際会議」の論文抄録(2/2)

姫野賢治・アスファルト舗装技術研究グループ 41

<用語の解説>

路床の構築 小島逸平 56

クアラゴン評価

(舗装用アスファルトの実用的な品質評価システム)

板垣和芳 57

総目次 第171号～第174号(平成4年度) 59

<統計資料>石油アスファルト需給統計資料 61

## ASPHALT

社団法人 日本アスファルト協会  
JAPAN ASPHALT ASSOCIATION

## 特集にあたって

安 崎 裕

建設省土木研究所道路交通総括研究官

最近、FWDという言葉が舗装の構造設計に関心のある技術者の間でよく話題とされる。このFWDはFalling Weight Deflectometerの頭文字をとったもので、落錘式たわみ測定機、あるいは衝撃式たわみ測定機と訳されるが、通常はFWDと略称されることが多い。

FWDの構造の詳細な説明は本特集の中の伊藤氏他のレポートを参照していただくとして、ここでは簡単に説明すると、舗装路面の円形載荷板の上に重りを落とすことによって生じた路面の変形を、複数のセンサーで同時に測定し、たわみ曲線として得るものである。

道路舗装でのたわみ測定といえば、ベンケルマンビームを使ったものが一般的に普及している。この方法は、簡便であり測定器も比較的廉価であるので、舗装全体としての支持力の一様性の確認や施工時の締固め不良箇所の有無のチェックなどの目的に使われている。しかし、1回の測定で載荷点直近の1点のみのデータしか得られないこと、荷重によるビームの前脚の沈下の影響が無視できないことなどから舗装の層構造としての解析・評価を行うには無理がある。そこで、これらの欠陥を改良したたわみ測定機として、これまでもロードレータ、ダイナフレクト、ラクロアなどが開発・使用されてきたが、載荷荷重が小さかったり、使い勝手が良くないことなどの理由からあまり普及はしなかった。

これに対し、FWDは、載荷荷重が比較的大きく実際の車両荷重に近い(道路用としては5tfあるいは7tf、空港用ではそれ以上)、載荷点以外にも3～6点のたわみ測定が同時にでき層構造としての解析が可能、構造が簡単で操作や保守が容易などの利点から最近、わが国の各研究機関で導入され、これを使った既設舗装の構造評価の調査や層解析に関する研究論文が増えてきている。

舗装の構造設計は、これまでの経験に基づくCBR-Ta法から、より設計の自由度の大きい理論設計法に将来移行すると思われる。また、舗装の維持管理や更新を適切に行うことは、舗装ストックが全国で70万kmを超えた現在、それらの補修費用が膨大になるだけに、道路管理者にとって極めて重要な課題である。その意味で、舗装の層構造を非破壊で評価し得るFWDは、これからの舗装技術にとって大きな役割を果たすと期待される。

しかしながら、このFWDは完成された万能の測定機ではなく、まだ限界のある測定機であることは事実であり、その利用法とともに、これから改善・開発すべき分野がまだ多く残されている。

そこで、FWDに関して造詣の深い諸氏の解説を集めた本特集を企画したので、FWD研究の現状に対してアスファルト誌の読者諸氏の理解が深まることを願うとともに、今後の利用法や研究の進め方について、ご意見、ご示唆をいただければと思う。

# FWDのメカニズム

伊藤 保彦\*  
福原 敏彦\*\*

## 1. はじめに

フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ (Falling Weight Deflectometer以下FWDと略す)は、各種のたわみ測定装置の1つで、走行車両に近い荷重波形で道路設計荷重と同じ荷重を舗装に加え、その時の載荷荷重と3~10点位のたわみデータを測定することができる装置である。

1970年代始めにアムステルダムのシェル石油中央研究所で開発されたものが基本となり、その後主に欧州で開発製造され、近年では世界各国に普及している。写真-1は原型のFWDである<sup>1)</sup>。

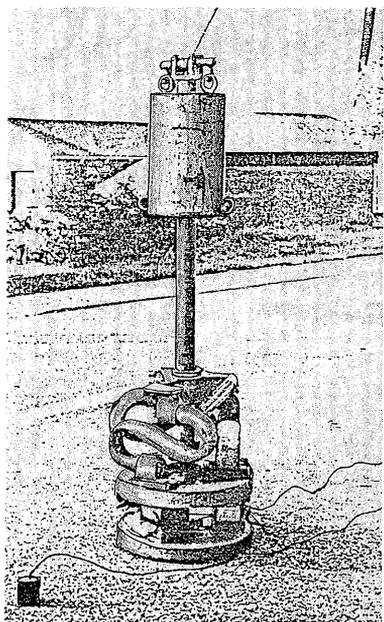


写真-1 原型FWD

現在全世界で300台余りが保有されており<sup>2)</sup>、わが国においても、1983年に運輸省港湾技術研究所、北海道工業大学、1987年に建設省土木研究所、新東京国際空

港公団に導入されて以来17台が稼働している。これらの機種の基本仕様は同一であるが、細部についてはそれぞれ若干の違いがあるのでここに述べる。

## 2. FWDの基本仕様

FWDには以下の基本仕様がある。

- (1) 載荷板が円形であり、載荷板中心のたわみが測定できる。
- (2) 重錘を自由落下させるという単純な機構で、道路舗装の場合の設計荷重である50kNの荷重を得ることができる。また空港舗装の場合の設計荷重は200kNであるが、これに対応させることのできる大型のFWDも製造されている。
- (3) 載荷時間が走行する車両の走行時間に対応している。
- (4) たわみ曲線を得るために、載荷板中心以外に2~9ヶ所のたわみ測定ができる。
- (5) たわみセンサは、基準ビームおよび不動点などを使用しないでたわみ測定ができる。
- (6) パーソナルコンピュータを利用していることにより、たわみおよび荷重データの整理時間が短縮でき、かつデータバンクを構築することができる。
- (7) 測定時間が短く(1地点約1分)、1ないし2名程度の人員で測定が可能である。
- (8) 基本モデルはトレーラ形式であるが、車載式のものも製造されている。

## 3. FWDの機種

世界のFWDは、フェニックスFWD、クアプFWD(クアプ社と技術提携している(株)マクロスFWDも含む)、ダイナテストFWD、コマツシステックスFWD(以下コマツFWDと略す)の4社で製造されている。

わが国においては、フェニックスFWDが3台、クア

\* いう やすひこ (株)マクロス試験機器部部长

\*\* ふくはら としひこ コマツシステックス(株)道路計測事業部長

ブFWDが11台、コマツFWDが3台の計17台が稼働しているが、ダイナテストFWDは導入されていない。機構的には、フェニックスFWD、ダイナテストFWD、コマツFWDはほぼ同一であり、クアブFWDはそれらと異なる特長をもっている。

機種別の最大載荷荷重容量には、50kN、80kN、100kN、150kN、200kNの種類があり、一般的には道路に50kNが空港には200kNが使用されている。また、最近載荷荷重が5kNと小さいが、コンパクトで持ち運びに便利な小型FWDも開発されている<sup>3)</sup>。

FWDの基本モデルはトレーラに搭載する型式であるが、最近では操作性、長距離の移動、保管および使用環境等を考慮し、車載式のものも多く製造されている。車載式には、市販のワゴン車およびマイクロバスを改造して搭載するものと、専用の車両を製作して搭載するものがある。

さらに、各FWDを構成する因子には、載荷方式によ

る載荷波形、載荷の0からピーク値までの経過時間、載荷板の直径および形状、たわみセンサの種類、たわみセンサ位置とセンサ個数、たわみセンサの最大たわみ量等がある。

表-1に、わが国で稼働しているFWDの諸元を示す。

写真-2~11に各機関のFWDを示す。

図-1~2に各機関のFWD概略図を示す。

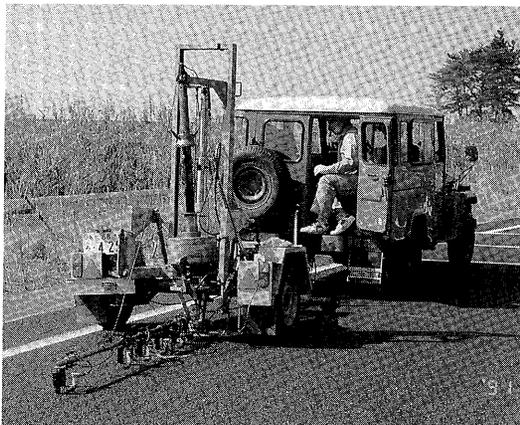


写真-2 機関No.2. 50kN FWD

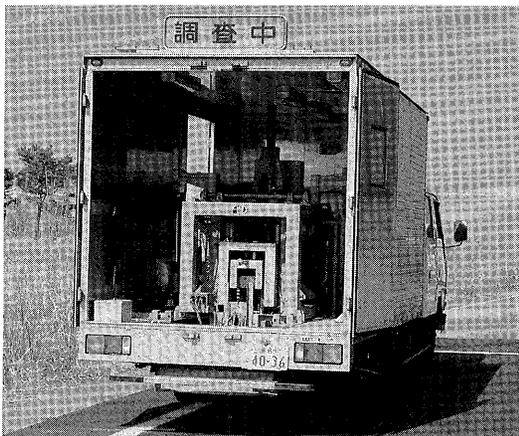


写真-3 機関No.4. 50kN FWD



写真-4 機関No.5. 200kN FWD

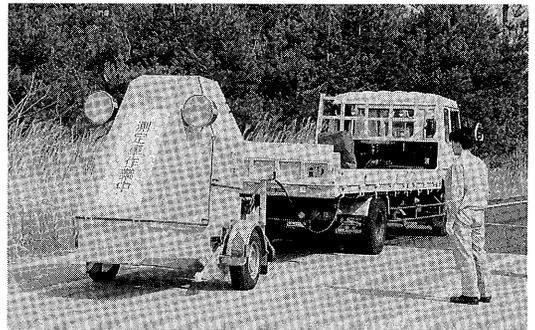


写真-5 機関No.8. 100kN FWD



写真-6 機関No.9. 50kN FWD

表一1 各機関のFWD諸元表

諸元	機関番号							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
メーカー	Phoenix社	Phoenix社	KUAB社	KUAB社	KUAB社	KUAB社	KUAB社	KUAB社
移動方式	牽引型	牽引型	車載型(運転時牽引型(測定時))	車載型	牽引型	車載型	牽引型	車載型(運転時牽引型(測定時))
載荷方式	単重錘システム	単重錘システム	複重錘システム	複重錘システム	複重錘システム	複重錘システム	複重錘システム	複重錘システム
載荷荷重	12 (任意) 50kN	12 (任意) 50kN	12.5, 25, 50kN	12.5, 25, 50kN	112.5, 150, 200kN	12.5, 25, 50kN	100, 150, 200kN	50, 80, 100kN
載荷板直径	300, 450mm	300, 450mm	300mm (4分割)	300mm (4分割)	450mm (4分割)	300mm (4分割)	450mm (4分割)	300mm (4分割)
たわみセンサ	ジオフォオン(速度計)	ジオフォオン(速度計)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)
たわみセンサ位置	0, 300, 750mm (任意)	0, 300, 600mm 900, 1200mm 2000mm (任意)	0, 200, 300mm 450, 600mm 900, 1500mm	0, 200, 400mm 600, 900mm 1500, 2000mm	0, 300, 450mm 600, 900mm 1500, 2500mm	0, 200, 450mm 600, 900mm 1500, 2500mm	0, 300, 450mm 600, 900mm 1500, 2500mm	0, 200, 300, 450mm 600, 750, 900mm 1200, 1500mm 2000mm
最大たわみ量	2 mm	2 mm	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)	5 mm (0~600) 2.5mm (900~)	5 mm	5 mm	5 mm	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)

諸元	機関番号							
	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14, 15	No.16	No.17
メーカー	KUAB社	KUAB社	コマツKMI50	KUAB社	KUAB社	コマツKMI50	Phoenix社	KUAB社
移動方式	車載型	車載型	牽引型	車載型	車載型	牽引型	車載型	車載型
載荷方式	複重錘システム	複重錘システム	単重錘システム	複重錘システム	複重錘システム	単重錘システム	単重錘システム	複重錘システム
載荷荷重	12.5, 25, 50kN	12.5, 25, 50kN	12 (任意) 80kN	25, 50, 80, 100kN	25, 50, 80, 100kN	12 (任意) 80kN	10 (任意) 150kN	25, 50, 80, 100kN
載荷板直径	300mm (4分割)	300mm (4分割)	300mm (4分割)	300mm (4分割)	300mm (4分割)	300mm (4分割)	300, 450mm (4分割)	300mm (4分割)
たわみセンサ	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	直接変位測定(LVDTタイプ)	ジオフォオン(速度計)	直接変位測定(LVDTタイプ)
たわみセンサ位置	0, 200, 300mm 450, 600mm 900, 1500mm	0, 200, 300mm 450, 600mm 900, 1500mm	-200, 0, 200mm 300, 600, 900mm 2000mm	0, 200, 300mm 450, 600, 900mm 1200, 1500mm 2500 mm	0, 200, 300mm 450, 600, 900mm 1200, 1500mm 2500 mm	-200, 0, 200mm 300, 600, 900mm 2000mm	-300, -200, 0mm 200, 300, 450mm 600, 750, 900mm 1500, 2000mm	0, 200, 300mm 450, 600, 750mm 900, 1200mm 1500, 2000mm
最大たわみ量	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)	5 mm	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)	5 mm	2 mm	5 mm (0~450) 2.5mm (600~)

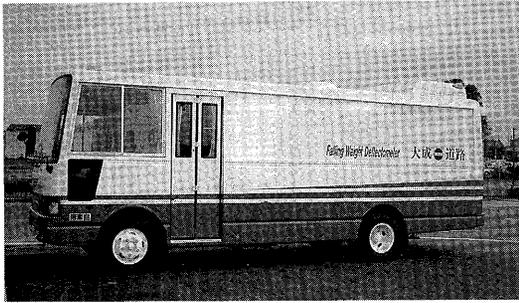


写真-7 機関No.10, 50kN FWD

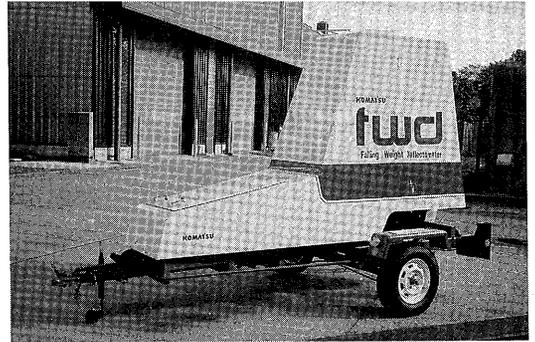


写真-8 機関No.11,14,15, 80kN FWD

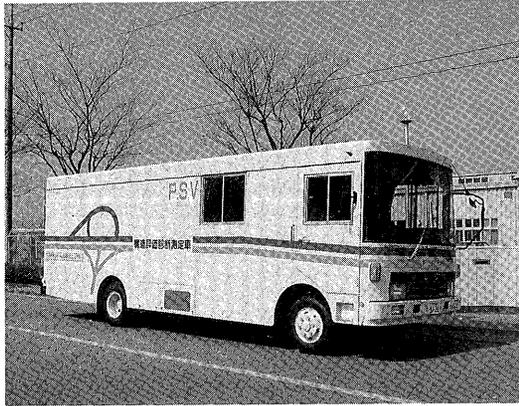


写真-9 機関No.12, 100kN FWD



写真-10 機関No.13, 100kN FWD

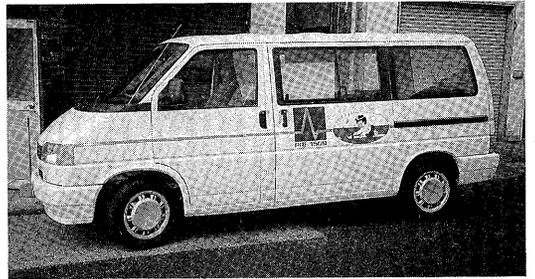


写真-11 機関No.16, 150kN FWD

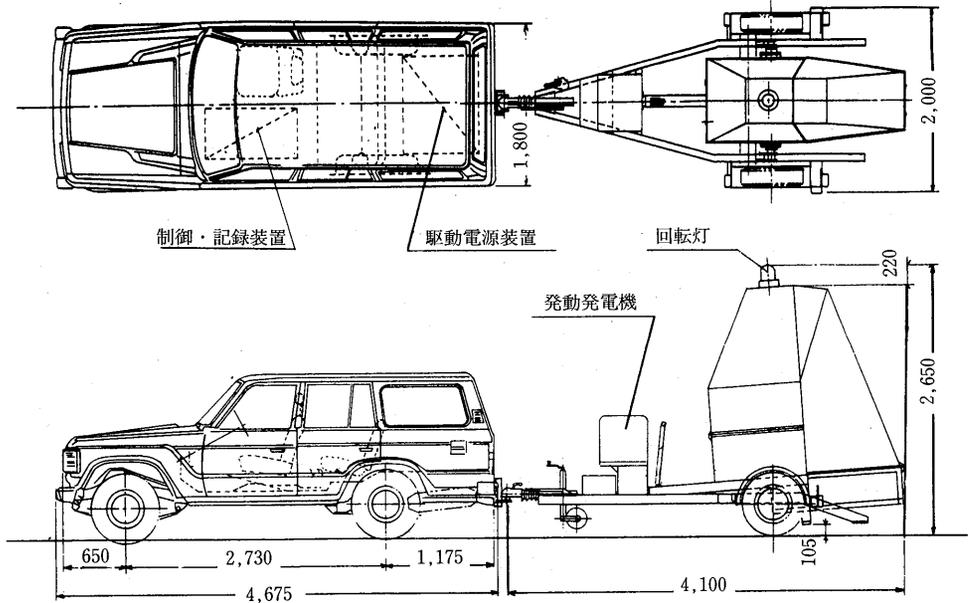


図-1 機関No.7, 200kN FWD

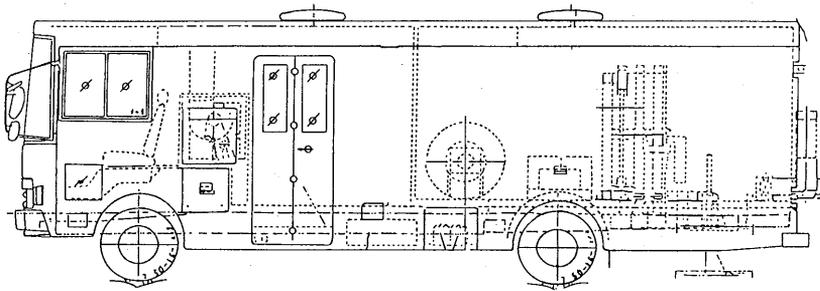


図-2 機関No.17, 100kN FWD

### 3.1 FWDの衝撃荷重発生機構

FWDは、重錘をある高さから自由落下させて衝撃荷重を発生させる方式で、発生する力の最大値のFmaxは次式で表わされる。

$$F_{max} = \sqrt{2 \cdot M \cdot g \cdot H \cdot R} \quad (\text{N}) \quad (3, 1)$$

- ここで、M：重錘の質量 (kg)
- R：バネ常数 (N/m)
- H：落下高さ (m)
- g：重力加速度 (m/S<sup>2</sup>)

したがって、衝撃荷重は落下高もしくは重錘の質量を変えることにより各種の荷重が設定できる。

衝撃荷重発生機構には、単重錘式<sup>4)</sup>(図-3)と複重錘式(図-4)がある。単重錘式は重錘が落下重錘1個で、直接載荷板上に落下重錘が落下し衝撃荷重を発生させる機構で、フェニックスFWD、ダイナテストFWD、コマツFWDがこの方式で、機構がシンプルであるという特長をもっている。複重錘式は、重錘が落下重錘と介在重錘の2個からなり、落下重錘が介在重錘に落下して衝撃荷重を発生させ、その荷重が介在重錘を介在して載荷板上に伝える方式で、クアブ社が開発

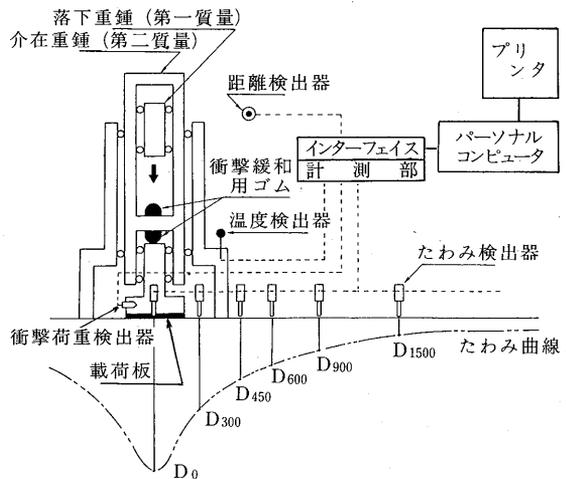


図-4 FWDの基本構造 (複重錘式)

した発生機構である。

複重錘式の特長は、路面に伝えられる荷重が実際の走行輪荷重に近い、滑らかな荷重波形と載荷時間が常に得られることである。しかし、重錘が2個となるため装置全体が重くなる短所がある。

図-5にクアブFWDの出力波形を示す。

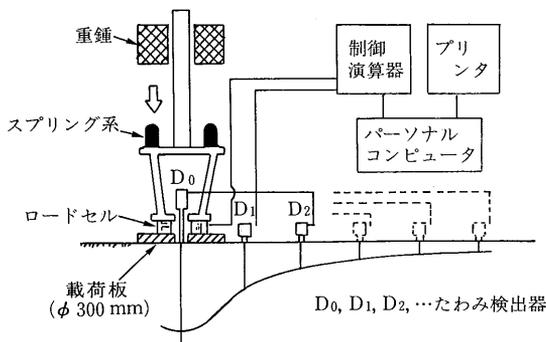


図-3 FWDの基本構造 (単重錘式)

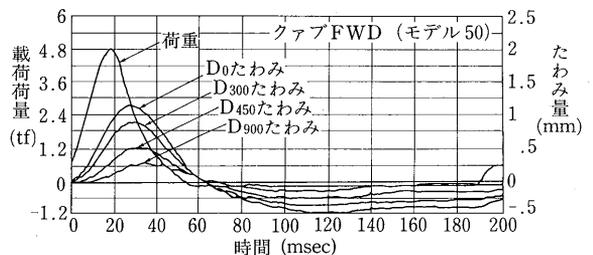


図-5 FWD出力波形

### 3.2 たわみセンサ

現在FWDに使用されているたわみセンサは、いずれ

も基準ビームおよび不動点を必要としない分解能0.001mmのセンサである。ジオフォン(速度計), 差動トランス(LVDT)と質量とを組み合わせた直接変位測定センサ(LVDTタイプ)および変位がパルス信号で得られるリニアゲージ方式による直接変位測定センサ(リニアゲージタイプ)の3種類がある。

ジオフォンは, フェニックスFWD, ダイナテストFWDに使用されているが, 現地で校正することができない欠点を持っている。LVDTタイプの直接変位測定センサはクアプFWDに使用され, センサには静的校正用のマイクロメータが取り付けられていることから, 現地で校正ができる。リニアゲージタイプの直接変位測定センサはコマツFWDに使用され, センサからの出力信号は変位に対して量子化されたパルス信号であるため, センサが故障しないかぎり校正を必要としない。

わが国で用いられているたわみセンサの設置位置は, 載荷板中心からの距離で-300, -200, 0, 200, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000, 2500mmの位置である。各装置の設置距離および個数は, 試験目的によって選定されている。ASTM規格のD4694では, センサの個数は任意で, センサの間隔は一般的に300mmとしている。

図-6に各直接変位測定センサの概要を示す。

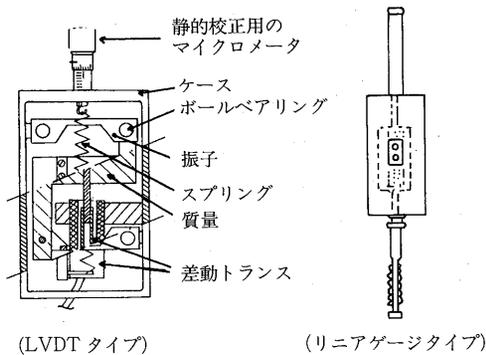


図-6 直接変位測定センサ

### 3.3 載荷板

載荷板は, 層構造理論との対応上から円形載荷板で, 道路舗装においては直径300mm, 空港舗装においては直径450mmが標準となっている。さらに, 載荷板は, 多少の凹凸がある路面にも均一に荷重が伝達するように, 4つに分割されたものが主力となっているが, より理想に近い均等載荷ができる新構造載荷板の研究開発も進められている。

図-7に4分割された載荷板の概略を示す。

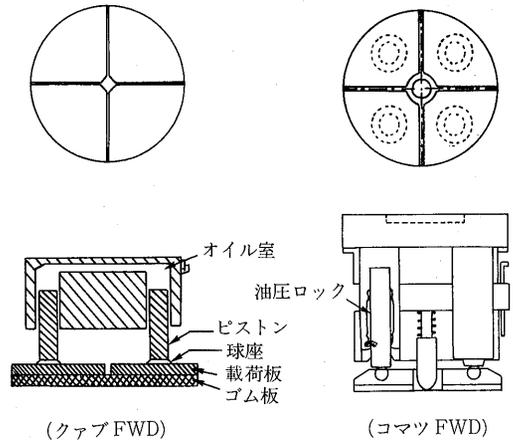


図-7 4分割された載荷板

### 4. 機種およびセンサによる違い

機種によって細部の仕様が異なるため, 測定結果にどの程度の差異があるのか, あるいはそれらの精度はどの程度であるか等を把握するために, 1991年3月に土木学会の舗装機能の評価技術に関する研究小委員会が建設省土木研究所内の舗装走行試験路で, 7機関のFWDを用いて同一箇所での測定を行う共通試験が実施された。

得られたデータが膨大な量であり, 詳細については現在も検討が行われている。1992年5月に土木学会の舗装機能の評価法に発表されたデータによれば, 各装置のたわみの精度はほとんどのセンサで変動係数が2%以下の良好な結果が得られた。また, 装置間の相関性についてもいづれのセンサも高い相関が認められたと述べられている<sup>5)</sup>。

### 5. あとがき

FWDがさらに活用されるためには, 測定値の再現性, 精度を高めるとともにセンサ位置および個数, 測定ポイントおよび測定回数, 舗装体温度等の測定方法を標準化し, 各装置の相関性を高め, どの装置で測定しても同じデータが得られるようなFWDにする必要があると思われる。

### — 参考文献 —

- 1) Claessen, A.I.M., C.P.Valkering and R.Ditmarsch : Pavement Evaluation with Falling Weight Deflectometer, AAPT Vol.45, 1976.
- 2) 笠原篤・丸山暉彦・姫野賢治: 舗装機能の新しい

評価方法, アスファルト, Vol.34, No.169, 1991, P25.

- 3) 笠原篤・古川真男・伊藤保彦:ハンディなフォーリング・ウエイト・デフレクトメータの開発, 第19回日本道路会議論文集, 1991.
- 4) 伊藤正秀・米塚善昭:フォーリング・ウエイト・

デフレクトメータによるたわみ量測定, 土木技術資料, 31-7, 1989, P36.

- 5) 土木学会 土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価技術に関する研究小委員会:舗装機能の評価法, 土木学会, 1992, P177.

---

## 重交通道路の舗装用アスファルト 「セミブローンアスファルト」の開発

B 5 版・132 ページ・実費頒価 3000円(送料実費)

当協会において, 昭和50年の研究着手以来, 鋭意検討されてきた重交通道路の舗装用アスファルトについての研究の集大成です。本レポートが, アスファルト舗装の耐流動対策の一助となれば幸いです。

目	次
1. 研究の概要	4.4 高速曲げ試験
1.1 文献調査	4.5 水浸マーシャル安定度試験
1.2 室内試験	4.6 試験結果のまとめ
1.3 試験舗装	4.7 品質規格の設定
1.4 研究成果	5. 試験舗装による検討
2. 舗装の破損の原因と対策	5.1 概 説
2.1 アスファルト舗装の破損の分類	5.2 実施要領
2.2 ひびわれ (Cracking)	5.3 施工個所と舗装構成
2.3 わだち掘れ (Rutting)	5.4 追跡調査の方法
3. セミブローンアスファルトの開発	5.5 使用アスファルトの性状
3.1 概 説	5.6 アスファルト混合物の性状
3.2 市販ストレートアスファルトの60℃粘度調査	5.7 第1次および第2次試験舗装の供用性状
3.3 製造方法の比較	5.8 第3次試験舗装の供用性
3.4 セミブローンアスファルトの試作	5.9 アンケート調査
3.5 試作アスファルトの特徴	5.10 試験舗装のまとめ
3.6 60℃粘度と他の物理性状の関係	6. む す び
3.7 薄膜加熱による性状変化	資 料
4. セミブローンアスファルトを用いた混合物の性状	1. セミブローンアスファルトの規格 (案)
4.1 概 説	2.1 石油アスファルト絶対粘度試験方法
4.2 マーシャル安定度試験	2.2 60℃粘度試験の共通試験
4.3 ホイールトラッキング試験	3. 舗装用セミブローンアスファルトの舗装施工基準

---

# FWDによる舗装の診断

姫野賢治\*  
井上武美\*\*

## 1. 舗装構造の評価方法

舗装が、平坦ですべりにくいという本来の機能を発揮できるか否かを調べるため、その舗装が構造的にどの程度健全であるかを測定する必要があるが、その方法として、舗装を開削して内部を調べる破壊試験法と、路面に外力を加えた時のたわみ量に着目したたわみ量測定法、路面を伝播する波動の特性に着目した表面波測定、路面上を高速で移動する地中レーダによって舗装厚さを調べる舗装構成測定等の非破壊試験法とがある。ここでは、この非破壊試験法に用いられる試験装置のうち、力学理論と直接に関連しているたわみ量の測定装置について述べる。

### 1.1 FWD以外のたわみ量測定装置の概要

たわみ測定の世界は、1938年にアメリカのカリフォルニア州道路局がGE社製のトラベルケージで測定したことに始まる。この方法は、たわみセンサー(LVDT)を道路に埋め込む定点でのたわみ測定方式であった。やがて、1955年にアメリカのA.C. Benkelmanによって開発されたベンケルマンビームがたわみ測定器として諸外国に広く普及し、現在でも一般的に利用されている。その後たわみ測定装置の精度向上、省力化を図り、また、実際の走行車両の荷重および載荷時間をシミュレートする目的で、世界各国で種々のたわみ測定装置が開発されてきた。これらを載荷方式で分類すると表-1のようになる。

表-1 たわみ測定装置の分類

載荷方式	たわみ測定装置
静的または移動荷重	平板載荷試験 曲率計 ベンケルマンビーム 自動たわみビーム マルチデプスデフレクトメータ
定常波振動荷重	ダイナフレクト ロードレータ 16kipバイブレータ
衝撃荷重	フォーリング・ウェイト ・デフレクトメータ(FWD)
マルチモード荷重	連邦道路局サンパー

以下、これらのたわみ測定装置の概略を簡単に述べる。

### (1) 静的または移動荷重によるたわみ測定装置

#### 1) 平板載荷試験 (Plate Bearing Tests)

平板載荷試験は、静的荷重によるたわみ測定の代表的なもので、油圧ジャッキにより舗装表面に設置されている剛性平板に荷重をかけ、ダイヤルゲージでたわみを測定する方法である。これは、永久変形を起こしやすいアスファルト混合物層上の測定には利用しにくい上に、試験を完了するまでに30分から1時間以上も時間がかかることから、現在ではあまり用いられていない。

#### 2) 曲率計 (Curvature Meter)

曲率計は、図-1に示すように、長く薄いアルミの棒の、両端に脚、および中心にダイヤルゲージを取り付けたもので、これを静止した複輪荷重の間に設置し、長さ300mmにわたってたわみ曲線の曲率と最大たわみを測定するものである。機構が単純で持ち運びできるほどの大きさである。

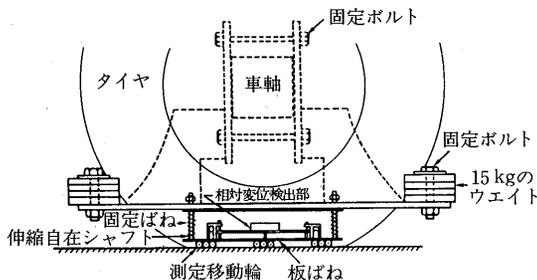


図-1 連続曲率計測定部の機構

#### 3) ベンケルマンビーム (Benkelman Beam)

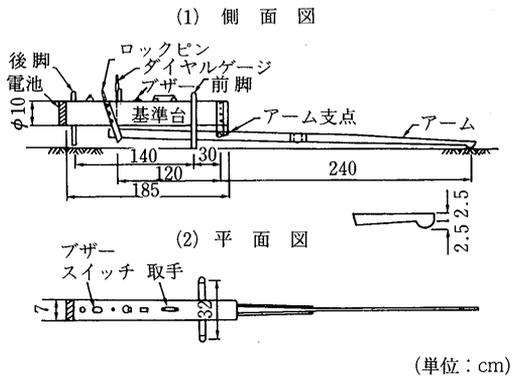
ベンケルマンビームはAASHO道路試験が行われた1955年に開発されたものであるが、舗装の研究、舗装の評価、オーバーレイ設計などに日本を始め世界各国

\*ひめの けんじ 北海道大学工学部土木工学科助教

\*\*いのうえ たけみ 日本舗道協総合技術部技術管理課長

の道路局関係者で広く用いられてきた。

ベンケルマンビームは、**図-2**に示すように、測定用ビームの先端を複輪荷重の間に設置し、車両を走行させてたわみ量を測定するもので、荷重車が移動するときに生ずる最大たわみ量を測定する方法と、荷重車を移動させて順次荷重を遠ざけたときの復元たわみ量を測定する方法とがある。



**図-2** ベンケルマンビームの機構

この装置は、用途が広く単純で安価であるが、測定速度が低く労働集約的であり、荷重トラックの背後に測定者を配置させなくてはならないなどの欠点がある。また、ビームの脚をたわみ曲線の外に設置する必要があるが、剛性の高い舗装においてはたわみの影響範囲が広いこととたわみの値が小さいことなどから、精度上の問題を有してはいる。しかしながら、これに基づいて舗装の修繕およびオーバーレイの経験的設計に関する多くの手法が開発されてきた実績は注目に値する。

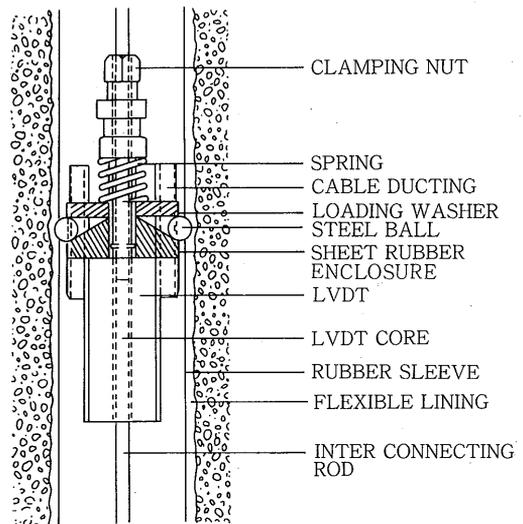
#### 4) ラクロワ・デフレクトグラフ (La Croix Deflectograph)

ラクロワ・デフレクトグラフは、自動たわみビームの1種に位置づけられ、ベンケルマンビームの測定速度の向上と自動化を図るために開発されたものである。載荷車に自動たわみビームを設備し、載荷車が一定速度で走行している間に、自動的にビームを測定点に動かす方式である。操作は完全自動化され、データはCRTに表示されるとともに磁気テープに収録されてコンピュータ処理されるが、原理はベンケルマンビームと同じで、当然同様な欠点を有している。

本装置に比較的似た装置に、英国式舗装たわみデータ収集走行機 (British Pavement Deflection Data Logging Machine)、土研式自動ベンケルマンビーム測定機、カリフォルニア式走行たわみ測定機 (California Traveling Deflectometer) などがある。

#### 5) マルチデプス・デフレクトメータ (MDD: Multi Depth Deflectometer)

マルチデプス・デフレクトメータは、舗装体の深さ方向のたわみ分布を測定する装置で、1970年代の後半に南アフリカで考案された。**図-3**のように舗装体に孔をあけ、舗装を構成する各層に対応した深さ位置に、たわみ量計測用の差動トランス (LVDT) を設置し、深さ約2mの所に設置したアンカー部と各LVDTのコアロッドを連結して、各層のたわみ量を相対的変位量として直接測定するものである。



**図-3** MDDの概略図

現在研究段階に入っている装置で、センサーが水平方向に並んでいるFWDとの相関性について、特に強い関心もたれているが、毎回測定位置に孔をあける必要があるため、舗装の強度そのものに影響を及ぼす上に測定が効率的ではないという欠点を有する。

#### (2) 定常波振動によるたわみ測定装置

##### 1) ダイナフレクト (Dynaflect)

ダイナフレクトは、1964年のテキサス運輸局の道路試験の成果に基づいて1965年に開発された。

**図-4**に示すように、偏心質量を持つ1組のはずみ車を8Hzで回転させることによって、振幅225kgfの正弦波状の動的荷重を発生させ、725kgfのトレーラ車体自重と重ね合わせて2輪のソリッドタイヤを介して路面に伝えながら、それによって路面に発生する動的なたわみ量を2輪の中心およびそこから各々30cm間隔に配置された2個の速度センサーによって測定するものである。これらの測定および制御の作業はコントロー

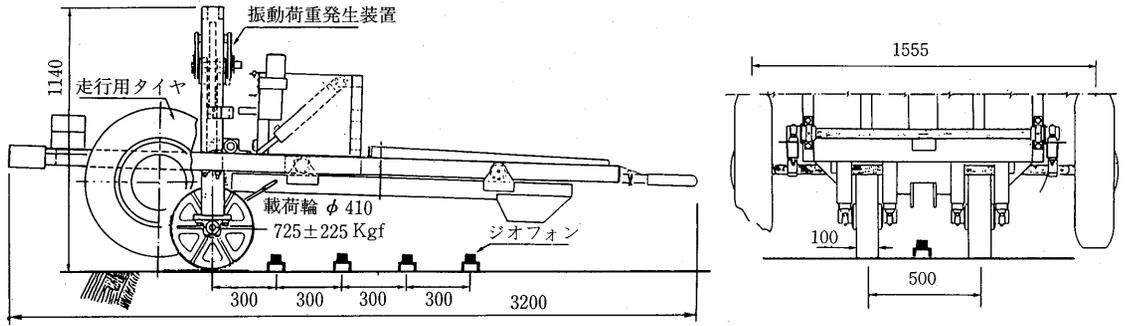
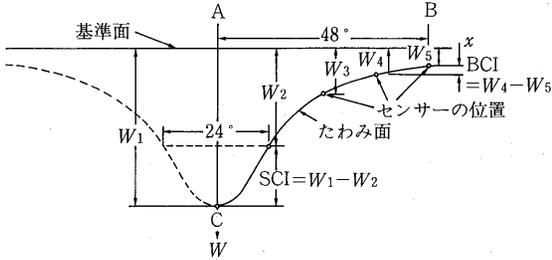


図-4 ダイナフレクトの概要

ルユニットにより1人で行うことができ、たわみデータはモニタリングされるとともにプリンターに出力される。

この装置で発生する荷重は、実車の輪荷重と比較してかなり小さく、また正弦波である点で実車両との対応を取る場合に注意を必要とするが、測定されたそれぞれのたわみデータは、隣合ったたわみの大きさの差によりいろいろな構造評価の指標が作られており、このような考え方は、現在盛んに行われている弾性係数の逆解析の概念を既に内包していると言えよう。

図-5に現在広く用いられている各指数の定義、および、表-2に舗装の構造評価の判定基準の例を示す。



DMD : ダイナフレクト最大たわみ量 ( $W_1$ )  
 SCI : 表層曲率指数 ( $W_1 - W_2$ )  
 BCI : 路盤曲線指数 ( $W_4 - W_5$ )

図-5 ダイナフレクトのたわみとそれに関連した指数

表-2 ダイナフレクトによる舗装の評価基準の例

(単位:  $10^{-3}$  in) (ユタ州)

DMD ( $W_1$ )	SCI ( $W_1 - W_2$ )	BCI ( $W_4 - W_5$ )	舗装構造の状態
1.25以上	0.48以上	0.11以上	路床, 舗装ともに弱い
		0.11以下	路床強く, 舗装弱い
	0.48以下	0.11以上	路床弱く, 舗装は限界
		0.11以下	構造は十分, たわみが大
1.25以下	0.48以上	0.11以上	構造は限界, たわみは十分
		0.11以下	舗装は弱い, たわみは十分
	0.48以下	0.11以上	路床が弱い, たわみは十分
		0.11以下	路床, 舗装ともに強い

アメリカ合衆国では、ダイナフレクトは舗装の構造評価のための主要な役割を演じていたが、その座をFWDに奪われつつある。わが国には、現在3台が導入されている。

### 2) ロードレイト (Road Rater)

ロードレイトは、油圧サーボ機構により路面に荷重を加え、そのときに発生するたわみ量およびたわみ曲線を測定するものである。ダイナフレクトと異なり、荷重の大きさや振動周波数を任意に変化させることができるという長所を持ち、一時的にかなり注目をされたが、やはり載荷荷重が実車両に比べてかなり小さいという欠点を有し、また、解析的な手法と結びついた積極的な利用がなされなかったため、必ずしも主流な装置になっている訳ではない。

### 3) 16kipバイブレータ (16kip Vibrator)

16kipバイブレータは、空港舗装の支持力を評価するために、アメリカ陸軍工兵隊水路実験局が開発したたわみ測定装置である。その測定原理は基本的にはロードレイトと同じであるが、静的荷重として72.5kNまで、さらに動的荷重として68kNまでを付加することができる。商業ペースで入手することはできない。

### (3) マルチモード荷重によるたわみ測定装置

#### 連邦道路局サンパー (FHWA Thumper)

サンパーは、1977年、アメリカ合衆国連邦道路局によって他のたわみ測定装置が持つ能力のほとんどを取り入れるために開発された研究用たわみ量測定装置で、荷重の大きさ、波形、周波数を任意に設定できる油圧サーボ装置を搭載し、路面のたわみを長さ3.35mの基準ビームに取り付けられた6個の差動トランスで直接測定する機構を有している。載荷重は最大40kN、周波数は0.1~110Hzに設定可能で、サイン波、ハーバーサイン波、三角波、短形波の動的載荷、ランプ波荷重、静的クリープ荷重、単発および間欠パルス荷重など、任意の載荷条件を設定することができる。特に、静的

荷重を舗装に与えることにより、たわみ形状とたわみの絶対値の時間的変化(クリープ現象)をも測定することができることから、粘弾性解析手法と相まって舗装の破壊を明確化し、設計法および補修法を最適化する手段として役立つことになろう。また路面温度は非接触式赤外線温度計により測定される。

サンパーは完全に自動化されており、1人で全ての装置を操作することができる。現時点では商業ベースでの入手はできない。

## 1.2 フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ (FWD: Falling Weight Deflectometer)

以上、さまざまな原理によるたわみ量測定装置を紹介したが、理論的には測定されたたわみ量単独では舗装の構造評価を行うことは不可能であり、このような認識が欠けていたために決定的なたわみ量測定装置が出現しなかったとも言えよう。ところが、ダイナフレクトを始めとする定常波振動によるたわみ測定装置が使用され、弾性係数の逆解析が試みられるようになると、より実際の車両に近い荷重による載荷のもとで、厳密なたわみ量を測定しなければ高い精度での構造評価は不可能であると認識されるようになった。

層構造理論との対応性をよくするために載荷板は円形で、荷重は道路舗装の設計荷重である50kN程度が必要となり、このため、重錘をある高さから自由落下させることによって、舗装に衝撃荷重を与え、その時のたわみを測定する方式である衝撃荷重によるたわみ測定装置が注目されるようになった。

衝撃荷重は、静的荷重、移動荷重および定常波振動荷重よりも実際の走行輪荷重をシミュレートした載荷荷重が得られる。この方式の典型は、フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ(FWD: Falling Weight Deflectometer)に採用されており、これは1970年代始めにアムステルダム大学のシェル石油中央研究所で開発されたものである。

アメリカ合衆国では、従来ダイナフレクトおよびロードレイタが多く使用されてきたが、新道路研究計画(SHRP: Strategic Highway Research Program)が、舗装のたわみ量の標準測定装置としてFWDを正式に採用したことは、両者よりもFWDの方が総合的に優れているとの判断によるものと思われるし、さらに、1987年にASTM規格D4694「重錘落下式衝撃荷重装置によるたわみ測定方法」およびD4695「舗装たわみ測定指針」として規格化されたことも評価の高さによるものであろう。さらに、舗装に関する最近の国内および

国際会議での論文においても、使用されているたわみ量測定装置はほとんどFWDであり、今後わが国でもたわみ量測定装置は、FWDが主流となるものと思われる。

ただし、FWDも必ずしも完璧なものではなく、理想とされるたわみ量測定装置は、高速で走行しながら非接触でたわみ測定を行う装置である。このたわみ測定装置が開発されれば、今日まで開発されてきたすべてのたわみ量測定装置が置き換えられることになるであろうが、開発には困難がともない、当分はFWDが注目され続けることになろう。

重複になるかも知れないが、FWDの特長をまとめると以下ようになる。

- ① 載荷板が円形であるために理論解析になじみやすい。
- ② 重錘を自由落下させるという単純な機構で、道路舗装の場合の設計荷重である50kNや、空港舗装の場合の設計荷重である200kNの荷重を載荷することができる。
- ③ 載荷時間が走行する車両の走行時間に対応している。
- ④ たわみ曲線を得るために、載荷板中心を含めて複数のたわみ測定ができる。
- ⑤ たわみセンサには、基準ビームや不動点などが必要ない。
- ⑥ 車両に搭載したパーソナルコンピュータを利用していることにより、たわみおよび荷重データの整理容易で、かつデータベースを構築することができる。
- ⑦ 測定時間が短く、1ないし2名程度の人員で測定が可能である。
- ⑧ 基本モデルはトレーラ形式であるが、操作性、長距離の移動、保管および使用環境等を考慮した車載式のものも製造されている。最近ではマイクロバスに搭載したもの、専用バスを製作し搭載したものも製造されている。

## 2. たわみの解析理論

以上、たわみ量の測定装置を紹介し、とりわけFWDが理論的な扱いが容易であることを述べてきた。以下では、このたわみ量を理論的に扱う方法を概観し、舗装の構造評価方法にこれをどのように利用するかについて触れたい。

### 2.1 たわみの解析理論の概要

一般に、構造物の力学解析は、構造物に何等かの外

力や内力が作用した場合に、その構造物がどのような挙動を示すのかを応力、ひずみ、変位などを指標にして把握する手段である。解析の理論は数学的に整然とした力学理論を背景に、厳密かつ論理的に発展してきた。

舗装の分野における構造解析は土質力学の一分野として端を発し、舗装特有の構造条件を加味しながら発展してきた。解析の背景となる力学理論としては、他の構造物と同様に、主として基本的な材料特性に立脚した弾性理論に基づいて展開されてきた。舗装の場合、対象とする構造は、広範囲に広がる特定の厚さを有する「層」の積み重ねといった構成である。このような構造系を一般に多層構造 (Multi Layered System) と称し、このような構造に対して弾性理論を応用した解析手法を多層弾性理論と称している。すなわち、多層構造をなす舗装表面に車両などの輪荷重が作用した場合に、舗装体の各所にどのように応力が伝播して、どれくらいひずみが生じ、全体的にどのような変形を生ずるのかを定量的に表現する理論である。外力による舗装の力学的挙動が正確に把握できれば、設計や評価を確実にかつ経済的に実行することができるため、解析の理論は舗装工学において不可欠なものとなるのである。

多層弾性理論に基づく舗装の構造解析においては、構造物の幾何構造として層の厚さ、材料の力学特性として層を構成する物質の弾性係数とポアソン比、外力条件として輪荷重と接地圧が入力として必要であり、出力として任意の座標における応力、ひずみ、変位を得るのが普通で、このような手順を順解析と呼んでいる。

一方、出力因子の一部が測定等によって得られているにも拘らず、入力すべき変数が未知な場合がある。たとえば、FWD等のたわみ測定装置で測定された表面たわみを既知数とし、各層の弾性係数を未知数として求めたい場合がこれに当たる。多層弾性理論の解は無窮積分を含んだ複雑な式で与えられており、たわみ曲線から弾性係数を直接計算することはできないため、弾性係数を得ることは、順解析を繰り返して得られるたわみを与える弾性係数の組合わせを求めるといった手順を踏まなければならない。このような手順を順解析に対して逆解析と称している。

現在、FWDによるたわみ測定と逆解析を組み合わせ、舗装の健全度の評価システムとして導入すべく研究が進められているが、その内容は大きく2つに分類

できよう。第1は得られた舗装の弾性係数が正しいものなのか、その精度はどの程度なのかを明確にすることであり、第2は計算プログラムを簡素化し、たとえばパソコンレベルで運用できるようにし、なおかつ計算速度を実用化レベルまで能率的なものに上げることである。

## 2.2 順解析理論の沿革

順解析は構造物に何らかの外力 (内力) が作用したとき、構造物に生ずる変形、応力、ひずみを、目的に合った構造解析の手法を用いて推定することであり、複雑な順解析はコンピュータの助けを借りて行われることが多い。ここでは舗装の分野で展開されてきた順解析の理論、解析手法について述べることにする。

もともと、経験によることの多い舗装の設計や評価を理論的に行うべく、舗装の解析に弾性力学理論が導入されてきた。舗装の解析の変遷を簡単にまとめると表-3のようになる。

表-3 舗装のたわみの解析理論の沿革

年代	解 析 事 項
1882	Cerrutiの半無限弾性体に水平荷重が作用した場合の解法
1885	Boussinesqの半無限弾性体に鉛直荷重が作用した場合の解法
1925	WestergaardがWinkler基礎上の弾性平板の式を公表
1931	松村が2層系問題の厳密解を公表
1933	Marguerreが2層系の境界面が滑らかな場合の解を公表
1940	Palmer, Barbarが2層系の表面変位の近似解法
1945	Burmister円形荷重による表面沈下の図表を公表
1948	Foxが2層問題の応力の数値解を公表
1949	Odemarkが2層系の表面変位の近似解を公表
1951	Acum, Foxが3層問題の数値解を公表
1955	牟岐の半無限弾性体のHankel変換による解法
1959	Meth, Velweyosが2層問題の数値解を公表
1961	Nascimenntoの多層地盤の表面変位の近似解法
1962	Jones, Peattieが3層問題の計算図表を公表
1963	Chevton社が多層弾性プログラムCHEV5Lを公表
1967	植下, マイヤホフ3層問題の厳密解を公表
1968	Shell社が多層弾性プログラムBISTROを公表
1973	Shell社が多層弾性プログラムBISARを公表

舗装の力学理論のルーツはBoussinesqの理論にある。Boussinesqは多層構造ではないが1885年に水平方向、鉛直下方向に無限に広がる弾性体 (これを半無限弾性体と称する) の表面に鉛直集中荷重が作用した場合に内部に生ずる応力、変位の厳密解を導いた。Boussinesqの解は地盤応力の解析において最も基本的なものであり、その後この解を線荷重、等分布荷重、放物形荷重などに拡張されてきた。このような力学問題はBoussinesq問題と称され、以後の舗装構造の解析理論に多大な影響を与えた。

半無限弾性体の表面に水平方向の集中荷重が作用する問題については、1882年にCerruttiがいち早く解析しており、その後1955年に牟岐がほとんどの表面荷重に対して統一的に得られる解を与えている。一方、Mindlin, Melanによって1930年前半に半無限弾性体の内部に水平方向あるいは鉛直方向に集中荷重が作用する問題に対して解が与えられた。これらの理論はBurmisterやMarguerreによって2層系、3層系へと発展されていった。

舗装の構造を最も単純にモデル化すると、舗装部分とそれを支持する路床の2層構造に帰着される。舗装を2層系として取り扱った解析理論として、弾性床上の平板の理論と2層弾性理論がある。平板の理論はかなり古くから研究されており、これが弾性床上に置かれた場合の理論については、1925年にWestergaardが敷き詰められたたばねの上に薄い弾性平板が載っている構造系に外力が作用した場合の応力や変位を計算している。その後Hoggによって半無限弾性体上の板についての解が得られている。これらの理論は主にコンクリート舗装の設計に適用されてきた。

2層弾性体の問題では村松が1931年に厳密解をはじめて公表しており、続いて1933年にMarguerreが解を得ている。これらのなかでもBurmisterの解法が最も著名であり、2層系の解析理論の他に実用的な図表も公表している。3層系以上の問題ではBurmisterの理論が応用されておりFox, Acumらによってはじめて数値化された。最近の国内においても木村、植下ら、三浦らの解析がよく知られている。特に、木村はいろいろな外力条件下に対する解法と数多くの解析結果の図表、および一連の地盤の弾性解析をまとめてその著書で公表している。地盤を粘弾性体とした解析も比較的単純なレオロジーモデルを用いて行われているが、レオロジーモデルのパラメータの同定が大きな問題となる。

多層弾性理論による厳密解は非常に煩雑であり、層数が多くなると図表も数多く必要となることから、多層構造の近似計算法も数多く考案されてきた。中でも、Odemarkの方法、Nascimentoの方法、上田らの方法、須田らの方法が有名である。そして多層弾性解析の解は、コンピュータの発達に伴ない1970年頃より多層構造プログラムとして汎用に供されるようになった。数値計算のアルゴリズムや層の数、境界条件の選定など改善され、BISAR、CHEV5Lなどのプログラムとして公表されている。現在ではコンピュータのハードウェアの発達によりパソコンレベルで作動可能なものまで

登場している。

以上のような多層弾性理論の他に、構造解析においてよく用いられる有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)などの数値計算法も1960年代後半には層構造の解析に用いられるようになった。これらの数値計算法は、複雑な材料構成則や構造的な不連続性についても対応することが可能であり汎用性が高い。そのため近年ではクラックの影響やコンクリート舗装の目地部の解析、動的応答や材料非線形性を考慮した解析等に多く用いられている。

一方、最近では構造物を非破壊で評価しようという気運から、舗装に対しても非破壊評価技術の導入が図られており、これに伴ってこれまで舗装の分野であまり展開されていなかった解析理論がみられるようになった。例えば、動的荷重による路面たわみデータから現位置の力学特性を推定するために必要とされる動的解析の理論、また舗装表面にインパルスを加え離れた位置でその応答を観測して表面波の伝達特性から舗装を評価する表面波伝播の理論が検討されている。

### 2.3 解析理論の問題点と今後の課題

舗装の解析理論として最も基本的で広く知られている多層弾性理論を実際の舗装に対して適用する場合、いくつかの注意すべき点がある。それは解析上の仮定と実際との相違である。すなわち、

- ① 舗装を構成する材料は質量をもたない等質等方性の完全弾性体ではない。
- ② 舗装の構造は半無限に広がっていない。
- ③ 実際の荷重条件は円形等分布ではなく、車両走行による移動輪荷重である。

このような相違がどこまで許容できるのかによってその理論の適合性が決定される。特に解析理論の根底をなす第1の問題に関しては、アスファルト混合物は粘弾性体に近いことや土の応力-ひずみ関係は複雑であり非線形性が強いこと等の実状が指摘されている。

解析理論をより実際に近づけるために、FEMやBEM、DEM(個別要素法)等の数値解析の手法を導入していくことも考えられる。これらの手法は力学の分野を数値解析でとらえるために計算力学(Computational Mechanics)という確立された学問分野があり、舗装分野への応用が期待される。また、解析理論が実用的なものとなるには、実際の構造物に即した構造パラメータを決定する方法が重要である。例えば、数値解析において非線形性や動的解析および解析モデルの幾何構造を考慮できるとしても、これらを

特性づける物性値を実際の舗装体に合せて設定する力学試験や材料試験方法の存在が前提となる。舗装材料は、アスファルト混合物をはじめとしてその特性が成分、密度、温度、載荷時間、載荷履歴などの要因に敏感で、他の土木材料に比べて特性が複雑で非常に把握しづらい。また、そのための、材料の物性を合理的に評価しうる試験法が必ずしも確立されているとはいえない。

構造解析の手法の発展、舗装に関する研究の進捗によって、再び舗装の力学理論が注目されている。今後、さらに先進的な技術を積極的に取り入れて、より合理的な舗装の力学理論を確立していくことが必要であろう。

### 3. たわみによる舗装の構造評価

舗装表面のたわみを非破壊で測定し、舗装の構造評価を行う目的は、舗装内部のどの程度の深さにどの程度の損傷があるかをなるべく正確に知ることである。容易に想像できるように、このためには、荷重直下の1点のたわみだけではなく、路面全体がどのようなたわみ曲線を示すかを知る必要がある。そして、ダイナフレクトで開発されたように、このたわみ曲線のデータから簡便に内部を推定する方法として、各センサーで測定されたたわみの差などから概略の情報を得ることも可能である。しかし、現在非破壊試験による舗装の構造評価の一般的な手順は力学的な理論に基づいて、測定されたたわみ量から弾性係数などの材料性状を求めるもので、この種の解析は逆解析(Backcalculation)と呼ばれている。ここでは、非破壊試験機を用いて舗装の構造的評価を行うために研究されている逆解析手法と、それらの舗装の機能評価への応用および逆解析を行う際に解析結果に影響を及ぼす因子について述べる。

#### 3.1 逆解析理論の概要

舗装の分野におけるこのような逆問題としては、FWD等により測定したたわみから舗装を構成する各層の弾性係数を求める問題がある。すなわち直接には測れない各層の弾性係数を、荷重を加えたとき舗装表面におけるたわみを正確に測定することによって間接的に求めようとする試みである。

与えられたたわみの値に比較的近い結果をもたらすような各層の弾性係数の組み合わせを、能率的かつ合理的に得られるような最小自乗法を用いた解析手法のほか、種々の方法が研究されており以下にこれらの解

析方法について示す。

#### (1) 図解法

現在のように高性能のパソコンが発達する以前においては、順解析によるたわみの計算に多大な時間を要し限られた者しか利用できなかった。そのため多層弾性理論等の計算によって求めたたわみあるいはたわみ比等を用いて作成したノモグラフを利用する図解法が行われてきた。

この方法は、簡便ではあるが、各計算条件ごとに予め順計算による図表を用意しておく必要がある上に、求められる未知数はたかだか2個までという制限がある。

#### (2) 等価換算厚による方法

等価換算厚は多層構造を厚さ $h_e$ で $E_0$ の弾性係数を持つ1つの層に換算するもので、Odemarkの仮定による式：

$$h_e = \sum CH_i \left( \frac{E_i}{E_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

ここに、 $h_e$ ：等値換算厚、 $H_i$ ：舗装厚、 $E_i$ ：弾性係数、 $C$ ：0.8~0.9の定数、から等価換算厚を求めるものである。これにより半無限の1層によるBoussinesqの式を適用し測定たわみから弾性係数を求めることができる。この等価換算厚法を利用して逆解析を行う方法には、R.L.LyttonやP.Ullidtzの研究がみられる。

#### (3) 最適化による方法

多層構造における各層の弾性係数を推定する方法として、測定たわみと何等かの方法により計算したたわみを比較し最適化を行う方法がある。その一般的な手順は、まず、各層の弾性係数、ポアソン比等を設定して、たわみを計算し、計算したたわみと測定たわみを比較し、両者の差が定められた誤差範囲内にないか、または収束の判断のため設定した評価関数の値が設定値より大きい場合は、両者の差が縮まるように弾性係数を修正し、たわみの計算を繰り返すもので、安定した解が速やかに得られるようにさまざまな研究が行われている。

近年開発されている主な逆解析手法を表-4に示すが、コンピュータ上で逆解析を行う場合、解析に要する時間は順解析に使用するアルゴリズムにも支配される。

最小自乗法により、実測たわみと理論たわみの残差を最小とする解を求める方法には、共役勾配法、最急降下法、Newton-Raphson法、Gauss-Newton法等の種々の方法があるが、わが国では、測定点の個数を $N$ 、

表-4 繰返し法による主な逆解析手法

著者名	プログラム名	順解析法	逆解析法	評価関数
松井 他		CHEV5L	Gauss-Newton法により最適解を求める	$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (u_i - z_i(x))^2$
姫野 他	LMBS	ELSA	Gauss-Newton法により最適解を求める	$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i (u_i - z_i(x))^2}$
Uzan 他	MODULUS	BISAR	残差が最小になるようにパターンサーチを繰返す	$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N w_i (1 - \frac{z_i(x)}{u_i})^2$
Irwin 他	MODCOMP2	CHEV5L	RMSが1%以下になるように繰返し計算	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i (1 - \frac{z_i(x)}{u_i})^2}$
Cauwelaert他	WESDEF (BISDEF)	WESLEA (BISAR)	回帰式よりEを予測	計算値とたわみの差が3%以下になるようにする
Tam 他	PADAL	BISAR	$E_{new} = E_{old} \left( \frac{z_i(x)}{u_i} \right)^k$ によりEを求め繰返し計算を繰返す	$\delta E =  E_n - E_{n-1} $
Marchionna他	PA. STR. EV	重回帰式を用いたたわみを計算	測定たわみとの誤差を最小にする	$S = \sum_{i=1}^7 (C_i - \sum_{j=1}^6 \alpha_{ij} x_j)^2$ C <sub>i</sub> : 測定たわみより, x <sub>j</sub> : 重回帰式より求める

$z_i(x)$ : 計算たわみ,  $u_i$ : 測定たわみ,  $i$ : 各センサ位置

未知パラメータ数をMとして、式：

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (u_i - z_i(x))^2$$

ここに、 $U_i$ :  $i$ 点での測定たわみ、 $Z_i$ :  $i$ 点での計算たわみ、 $W_i$ :  $i$ 点での測定値の信頼度を示す重み係数、 $X = \{X_j\}$ : 各層の弾性係数などの舗装構造の特性を表す未知パラメータ、を評価関数とし、Gauss-Newton法により、この評価関数を最小にする最適解を求めるのが一般的である。

最適解を求めるためには、未知数に関して非線形な連立方程式を解かなければならないが、Gauss-Newton法では、大まかに推定された未知数  $X_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) とより最確値に近い値との差である  $\delta X_j$  のM個の未知数に対して、M本の線形方程式：

$$\sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^N w_i \frac{\partial z_i}{\partial x_j} \right) \delta x_j = \sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial x_i} w_i (u_i - z_i(x)) \quad (I=1, 2, \dots, M)$$

をたて、これを  $X_I$  に関して解けば良い。

最小自乗法により最適解を求めた場合、解の唯一性と不安定性に問題があることがしばしば指摘されているが、これは妥当な推定値を得ることが不可能であるという主旨ではなく、逆解析に技術者の判断をうまく組み込むことが大切であることを指摘するものである。

この問題を解決し安定した解が得られるように、逆解析のプリ・ポストプロセッシングとして知識データベースによるエキスパートシステムの組み込みを試みることが提案されている。プリプロセッシングとしては技術者の経験等から適切な初期値や弾性係数の範囲を求め、ポストプロセッシングとして得られた値が経験や周囲の

状況からみても妥当なものであるかどうか判断し、妥当な値でない場合は再検討を行うものである。また、さまざまな弾性係数から得られるたわみをデータベース化し、パターンサーチ法により計算たわみを求め誤差の自乗和を最小にするように繰返す手法を用いている場合もある。このような方法を用いることにより、順解析に厳密解を用いる場合に比べ解析時間を著しく短縮でき、測定現場のパソコンにより直ちに弾性係数を求められることを示している。

### 3.2 舗装機能評価への応用

現実の問題として、現地における測定においてはさまざまな誤差が混入するし、また逆解析に伴う解析上の誤差も存在する。そのため、逆解析にあたってはそれらの誤差の影響について十分な配慮が必要である。本節では、舗装構造評価に逆解析を利用するにあたって考慮すべき留意点、逆解析を適用した舗装の構造状態の評価事例などについて示す。

#### (1) 逆解析結果に影響を及ぼす要因

逆解析で求められた弾性係数の精度は、そこに入り込む誤差が系統誤差なのか、あるいは偶然誤差なのかによって取扱いが異なる。前者によるものはその原因と誤差の大きさを正しく把握すること、後者によるものは誤差を許容範囲内にするために測定回数をどの程度行うかを知ることが重要である。

系統誤差には、

- ① 動的な現象を静的理論を用いて解析することによる誤差
- ② 舗装体の慣性質量を無視することによる誤差

- ③ 荷重パルスのピーク時間とたわみセンサのピーク時間の相違による誤差
- ④ 線形弾性理論の本質的な仮定に起因する誤差
- ⑤ 材料のもつ力学的非線形性（応力-ひずみの非線形関係）による誤差
- ⑥ 大変形時の幾何学的非線形性による誤差
- ⑦ 舗装を構成する各層の均質等方性による誤差
- ⑧ 水平方向、垂直方向に無限には広がっていないことによる誤差
- ⑨ 舗装表面には載荷板以外からの荷重を無視することによる誤差
- ⑩ 舗装を構成する各層の境界面における応力、ひずみ、変位の連続性による誤差
- ⑪ 有限要素法を用いる場合には境界条件の制約に伴う誤差
- ⑫ 載荷板から路面に加えられる荷重を等分布とすることによる誤差
- ⑬ 載荷板の直径と載荷板付近のたわみセンサ位置に起因する誤差
- ⑭ 舗装体内の温度勾配に起因する誤差
- ⑮ 路盤、路床の含水量の変化に起因する誤差

などが、また、偶然誤差には、

- ① 深さ方向に沿った材料性状の変動による誤差
- ② 舗装厚の変動による誤差
- ③ 縦断方向に沿った材料性状の変動による誤差
- ④ 荷重センサの精度による誤差
- ⑤ たわみセンサの精度による誤差

などがある。また、誤差に分類されるものではないが、逆解析を行うにあたって重要な問題の1つに、解の唯一性がある。舗装を構成している層の数だけの解があると言われており、得られた解の妥当性を判断するには技術的経験が必要としている。

#### (2) 逆解析結果の信頼性

以上に示した逆解析結果の信頼性に及ぼす要因について、現在までに得られている主要な知見を以下に箇条書きにして述べる。

- ① 載荷点から離れると、路床以外の弾性係数の変動はたわみにほとんど影響しない。
- ② たわみの変動が弾性係数に及ぼす影響は、載荷点に近く、表面に近い層の弾性係数ほど大きい。
- ③ たわみが $1\mu\text{m}$ 程度変動すると、推定された各層の弾性係数は1~2%程度変動する。
- ④ 表層に近い層の推定弾性係数の値は、たわみセンサの位置が載荷板に近いほど、また間隔が狭いほど

精度が向上するが、深い層の推定弾性係数の値はこの逆である。

- ⑤ 舗装厚さの変動が推定弾性係数に及ぼす影響は、表層に近い層ほど大きく、路床以外の各層の厚さにおける $1\text{mm}$ の誤差はほぼたわみ $1\mu\text{m}$ の誤差に相当する。

#### 3.3 まとめ

逆解析によって推定される弾性係数の精度を向上させる種々の努力がなされているが、材料の変動や舗装厚の変動が推定弾性係数の精度に及ぼす影響は非常に大きく、また、現在利用可能なたわみセンサの精度も十分に満足のいくものではない。現段階では、推定される弾性係数の精度は有効数字2桁程度が限界であろう。しかしながら、舗装の開削を必要とせず、一時的な交通規制をするだけで実施できる非破壊試験と逆解析を行うだけで、この程度の精度で舗装の構造評価が可能になったという事実は、非常に注目に値するものと思われる。今後は、室内試験との対応を図りつつ、システム全体の信頼性をさらに向上させる研究が望まれよう。

#### 4. 現行の設計法との関係

FWDによる舗装の構造評価と「アスファルト舗装要綱」に示されている舗装の構造設計法( $T_A$ 法)との関係について、関連報告や測定結果の実績等から得られている知見等を紹介する。

##### 4.1 路床のCBR値との関係

路床のCBR値は舗装の構造設計に不可欠な設計条件である。従って、FWDによる舗装の構造評価における健全度を等値換算厚( $T_A$ )を指標として診断する場合にも、各層の等値換算係数と併せて路床のCBR値を推定する必要がある。

FWDのたわみから求めた路床の弾性係数( $E$ )とそのCBR値とは図-6<sup>1)</sup>に示すように、一般にいわれている $E=100\text{CBR}$ に近い関係とみなせる。また、載荷荷重の中心からある程度離れた位置( $150\text{cm}$ )のFWDのたわみ量( $D_{150}$ :mm)と路床の弾性係数には、 $E=100/D_{150}$ の関係<sup>2)</sup>があり、この関係と図-6の相関から、FWD測定中に路床の現場CBRを概ね推定することも可能である。

##### 4.2 弾性係数と等値換算係数との関係

舗装各層の弾性係数と等値換算係数との関係について、AASHTOの設計指針<sup>3)</sup>には弾性係数(レジリエント係数)から等値換算係数を求める考え方が示されて

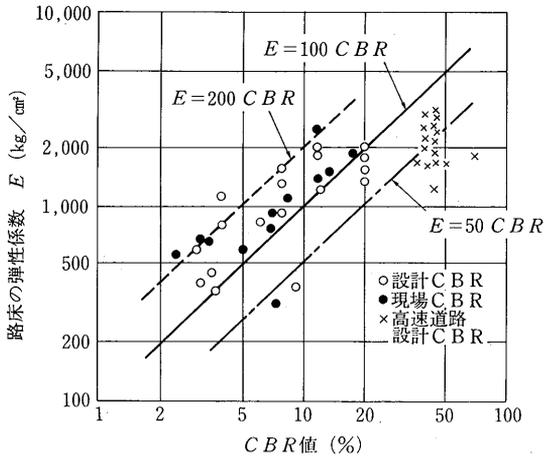


図-6 CBR値とFWDたわみより求めた弾性係数Eの関係<sup>1)</sup> (砂質土は除く)

いる。この指針に示されているアスファルト混合物の弾性係数は繰返し間接引張り試験<sup>3)</sup>で、粒状路盤材料の弾性係数は繰返し3軸試験<sup>4)</sup>で求めることとされている。

我国において、弾性係数と等値換算係数の関係を検討した報告は評価の考え方の違いもあって少ない<sup>5,6)</sup>。アスファルト混合物の弾性係数は、繰返し間接引張り試験から、荷重速度にもよるが25℃の温度条件で概ね25000~40000kgf/cm<sup>2</sup>程度とされている<sup>5,7,8)</sup>。

また、図-7<sup>9)</sup>は、FWDのたわみから逆解析により求めたアスファルトコンクリート層(以下アスコン層)の弾性係数と繰返し間接引張り試験の弾性係数との関

係を温度に対して示したものである。アスコンの弾性係数は、温度や荷重速度によって変化するので、アスコンの弾性係数を評価する場合、温度や荷重速度等を考慮する必要がある。(AASHTOの設計指針では20℃のアスファルト混合物の弾性係数について等値換算係数が示されている)。

アスコンの弾性係数と等値換算係数との関係については、今後更に検討を要す事項と考えられるが、測定温度でのアスコンの弾性係数を逆解析で求め、これを20℃に換算して等値換算係数を求めるようにしている。

図-8<sup>6)</sup>は繰返し3軸試験による路盤材(粒状材、セメント安定処理、石灰安定処理)の弾性係数と「アスファルト舗装要綱」に示されている等値換算係数との

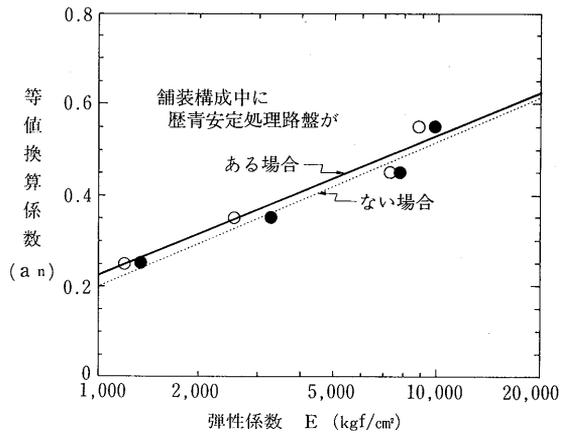


図-8 路盤材料の等値換算係数と弾性係数との関係<sup>6)</sup>

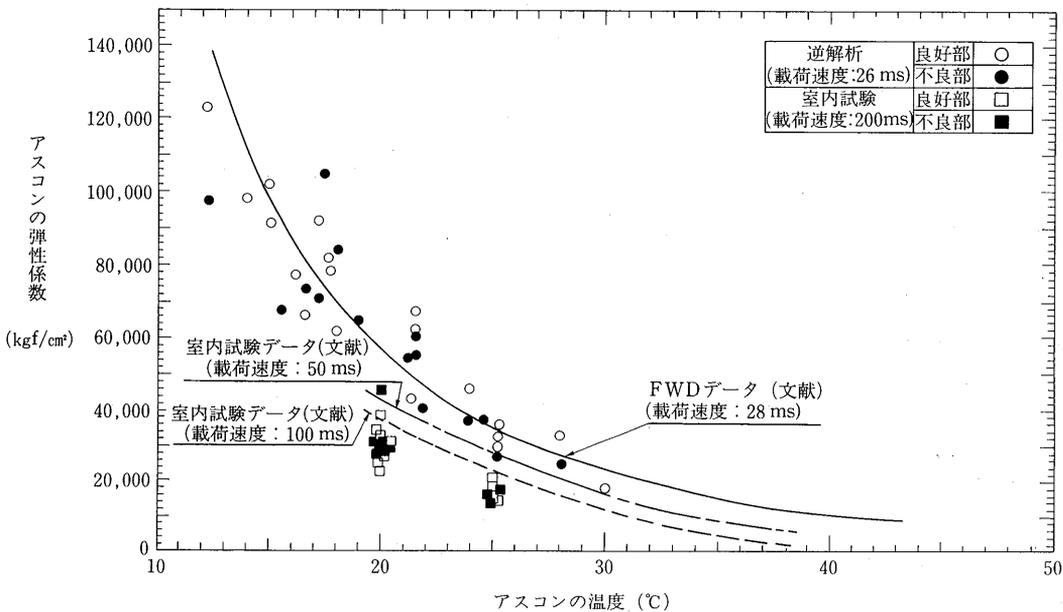


図-7 アスコン温度に対しての既往資料及び室内実験結果と逆解析の弾性係数<sup>9)</sup>

関係の一例である。片対数軸上で直線関係にあり、AASHTOの設計指針の関係と同様の結果となっている。

図-9<sup>9)</sup>は、舗装の構造評価の測定箇所から採取した路盤材の繰返し3軸試験の結果に、FWDのたわみから逆解析により求めた路盤の弾性係数を示したものである。載荷荷重が5 tonの場合、路盤に作用する主応力は1.2kgf/cm<sup>2</sup>程度と考えられ、再締めめた供試体の繰返し3軸試験の弾性係数と良好な箇所の逆解析の弾性係数とはほぼ妥当な値となっている。

#### 4.3 T<sub>A</sub>法に拠った舗装の構造評価と診断例

以上の各弾性係数と路床の現場CBR及び各層の等値換算係数との関係を用いて、現行の舗装の構造設計のT<sub>A</sub>法に拠った構造評価方法と診断の一例<sup>7)</sup>を示す。

舗装の構造的価値は残存等値換算厚(以下、残存T<sub>A</sub>)を指標として評価している。残存T<sub>A</sub>は、逆解析により求めた各層の弾性係数に対する等値換算係数を、アスコ

層についてはAASHTOの設計指針を参考に、路盤層については前掲の図-8から求め、各層の層厚を用いてT<sub>A</sub>法の計算方法により求めている。

舗装構造の健全度の診断は、図-10に示すように路床の弾性係数に対して残存T<sub>A</sub>がどの程度かを、設計値及び路面性状とで区分した形で示し、設計交通量に対する設計T<sub>A</sub>を満足しているか否かと路面性状が健全な区間との対比によって判断している。図中の設計T<sub>A</sub>は

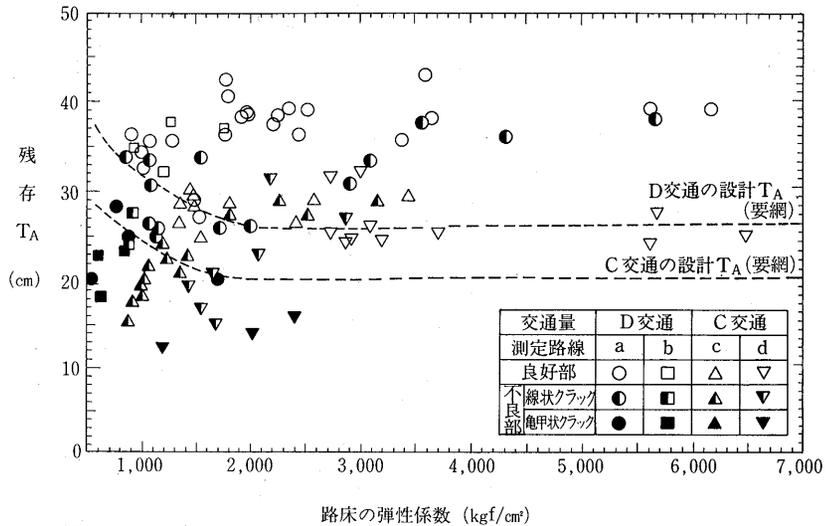


図-10 路床の弾性係数に対する残存T<sub>A</sub>の結果例<sup>9)</sup>

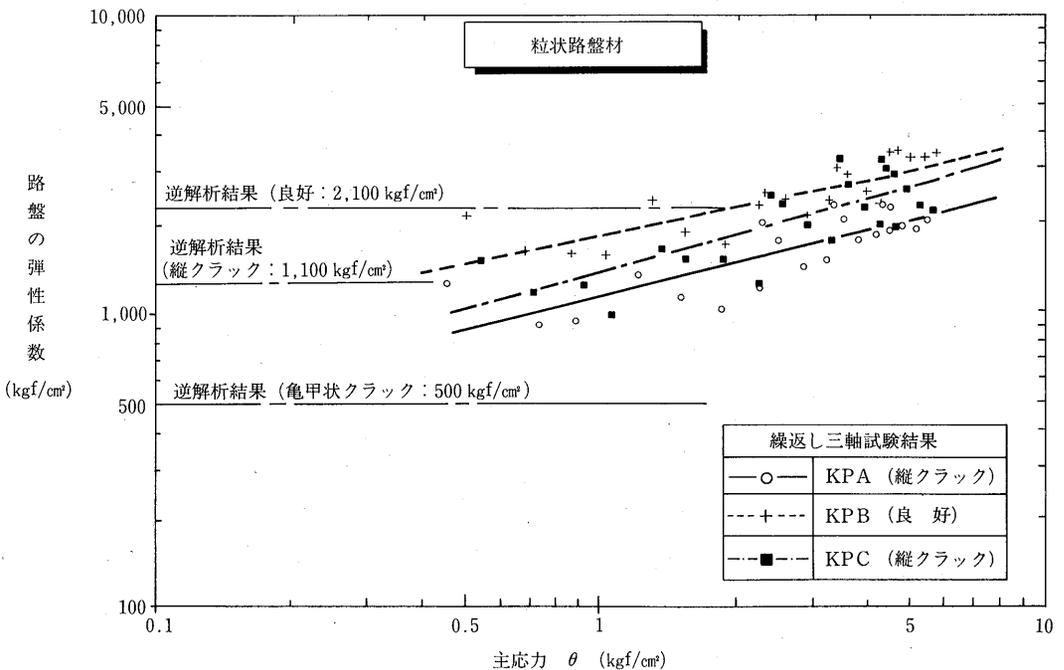


図-9 路盤材の繰返し三軸試験結果と逆解析の弾性係数<sup>9)</sup>

路床の弾性係数を $100 \times$ 設計CBRとして、「アスファルト舗装要綱」に示されている設計交通量の区分の目標 $T_A$ である。また、構造的に問題がある箇所の舗装各層の健全度についても各層の必要支持力（設計に用いた等値換算係数から既述の関係を逆に使って求めた弾性係数）と比較することで検討ができる。

#### 4.4 現行の設計法との対応

この残存 $T_A$ による構造評価と診断は、ほぼ実際を説明できる点で妥当なものとしてきている。しかし、弾性係数と等値換算係数の関係については更に多くのデータにより適切な関係になっていくと考えている。

また、弾性係数と等値換算係数の関係を適用することによって、弾性係数から構造的な耐久性の指標ともなり、現行の $T_A$ 法を活かした維持・修繕計画における

不足 $T_A$ （設計 $T_A$ －残存 $T_A$ ）の定量的な評価等もでき、修繕の工法選択や等値換算係数の規定されていない材料を適用する場合等の構造設計の一資料として捉えることができる。

なお、「アスファルト舗装要綱」にはその他の設計法として、路床を設計CBRで評価することができない場合や特殊な工法の場合に採用する多層弾性理論を使用した設計方法も示されている。この方法によって設計された舗装の維持・修繕計画においても既設舗装の構造評価は $T_A$ 法と同様に各層の弾性係数を逆解析で推定し、等値換算係数を介さずに検討できるのは勿論である。

この推論として、2つの設計方法の統一も今後可能となっていくと考えている。

#### — 参考文献 —

- 1) 丸山暉彦, 姫野賢治, 林正則: FWDたわみ測定による舗装の健全度調査, 舗装, 1989.9, pp.3~8
- 2) AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986, AASHTO
- 3) Standard Method of Indirect Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, ASTM Designation: D4123-82
- 4) Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrads Soils, AASHTO Designation: T274-82
- 5) 村上浩, 内田精一, 溝渕優: アスファルト混合物の等値換算係数と弾性係数に関する一考察, 土木学会第44回年次学術講演会, 平成元年10月, pp.124~125
- 6) 井上武美, 内田精一, 井原務: 舗装用路盤材料の等値換算係数の検討, 第23回土質工学研究発表会, 昭和63年6月, pp.2015~2016
- 7) 阿部長門, 宇佐美圭一, 丸山暉彦, 姫野賢治: アスファルト混合物のレジリエントモジュラス, 土木学会第47回年次学術講演会, 平成4年9月, pp.118~119
- 8) 増山幸衛, 峰岸順一, 稲垣竜興: 弾性係数及びレジリエント係数(Mr)についての一検討例, 土木学会第47回年次学術講演会, 平成4年9月, pp.116~117
- 9) 井原務, 井上武美, 陶山武彦: アスファルト舗装の評価診断・修繕設計支援システムの開発, 道路建設, 1991.5, pp.44~53

☆

☆

☆

☆

☆

☆

# FWDによるたわみ測定の実際

雑 賀 義 夫\*

## 1. はじめに

わが国における道路網の整備や舗装率の増加は漸く高域に達し、近年では貴重な社会資本としてこの蓄積された道路舗装の維持管理に多大な努力を要する段階を迎えている。すなわち、舗装は、交通荷重、気象条件等の外的作用を常に受け、また、舗装自体の老朽化等により放置しておけば供用性能が低下し、やがては円滑かつ安全な道路交通の確保に支障をきたすようになる。これを防ぐためには、常に道路の状態を把握し、適切な舗装の評価とそれに応じた維持修繕を行うことが必要であり、効果的に対処するために舗装評価が極めて重要な役割を果たしている。

現在、舗装の評価手法には路面性状に関連するサービス性能からみた評価と舗装構造自体の支持力に関連する構造評価という2つの異なった方法が利用されている。前者のサービス性能とは、舗装が交通に提供し得る能力のことであり、道路利用者の主観による安全性、快適性の視点から定められるPSIや、道路管理者の観点から維持修繕の必要性により定められるMCI等による評価がある。これらの指標はひびわれ率、わだち掘れ量、縦断凹凸等の管理項目により表現されるため、レーザーや連続写真による自動測定を用いて機械的に定量化することが可能で、従来から一般国道、高速自動車道を中心にこれらの測定結果をデータベース化する努力が精力的に行われている。

他方、後者に属する舗装の構造的な支持力の評価については、舗装を表層から順次開削し、各層の強度等を調べる破壊探査法があるが、この方法は多大な労力を要するためにあまり一般的でない。このため、近年では荷重を加えたときの路面のたわみ量やその曲率、あるいは振動や弾性波の伝播速度等に着目した非破壊探査法が注目されるようになってきた。そのうち、舗装のたわみ測定装置は国の内外で最も頻繁に利用され、データの蓄積が多いものはベンケルマンビームである。

しかし、ベンケルマンビームは支持脚の沈下の影響を除去できないこと、荷重、載荷速度の大きさにバラツキが大きいこと、装置が安価である割には1測点当りの単価が高くつくこと等の欠点を有している。また、海外においては、ダイナフレクトが用いられることも多い。このダイナフレクトは再現性には優れているが、最大荷重が約1tでトラックや航空機の輪荷重に比べかなり小さいこと、波形が正弦波で実現象との対応が付け難いこと等の欠点がある。

これに対し、本特集に取り挙げられたフォーリングウェイトデフレクトメータ(FWD)は、装置自体はやや大きいが上記各手法の欠点を概ね克服しており、海外においても最近かなり多く利用されるに至っている。特に第2のAASHO道路試験とも呼ばれているSHRP計画においてはFWDがたわみの標準測定装置に位置づけられており、これに伴って国際的にもFWDに関する論文が数多く発表されるようになってきた。

しかしながら現在、舗装の維持修繕はひびわれ、わだち掘れ、平坦性といった舗装の路面性状のデータに基づいて、補修が必要かどうかの判断や補修工法の選択などが行われている。そのため、構造面での評価が不十分なために早期の破損をきたすなど補修サイクルが短くなってしまった例がみられることも周知のごとくである。これらのことから、効率かつ適切な維持修繕を行うためにも、既設舗装の構造面での的確な評価の必要性がとみに高まっているのが現状である。

本報告では、FWDに関する諸事項のうち、舗装の構造評価・診断を行うためのFWD測定方法、測定区間の考え方や調査上の留意点などについてその要点を述べる。

## 2. FWD測定方法

FWD測定方法については既にいくつか紹介されているが<sup>1)</sup>、以下にその代表的な手法を概説する。

\*さいか よしお 東亜道路工業株式会社技術研究所課長

## 2.1 FWD装置

FWDの基本的な構成は、測定装置本体を搭載あるいは牽引する車両、および次のような機器からなる測定装置から構成されている<sup>2)</sup>。

- (1) 載荷板
- (2) 荷重発生装置
- (3) たわみ測定センサ
- (4) 荷重測定装置
- (5) 測定制御およびデータ保存装置

## 2.2 たわみの測定手順

(1) FWD測定の対象路線について舗装構成、路面性状、交通量、補修履歴等の資料を収集する。資料が不十分な場合は現地調査等を行い状況を把握する。

FWD測定結果の検討・解析においては、舗装構成層の弾性係数を推定や後述のような解析区間の分類を行うことが一般的であるため、上記の資料は重要な情報となる。

- (2) 測定中の装置は、トラック等に搭載あるいは牽引されており、本機の運転・操作等は1～2名の操作員により行う。
- (3) 装置を測定位置に移動し、停止する。測定位置は、載荷板が適切に設置できるように石、異物等があれば取り除く。
- (4) 測定位置に載荷板、たわみセンサを路面に設置する。
- (5) 重錘を所定高さまで持ち上げ、落下させる。このとき生ずるたわみと荷重を記録する。この手順を所定回数繰り返して測定を行う。
- (6) 載荷板、たわみセンサを持ち上げて、次の測定位置に移動し、(3)～(5)の手順を繰り返す。

通常、一地点において2回以上測定を行う。1回目の測定値は載荷板やたわみセンサと路面の接触が不安定なためにバラツキが大きく、1回目の測定値を除去し残りの測定値からその地点のたわみ量を求める。すなわち、1回目の載荷は予備載荷とみなし、2回目以降の載荷によるたわみ値を測定値として採用する。

測定位置、すなわち載荷板を設置する位置は外側車輪通過位置を標準とし、縦断方向に測定する場合が一般的である。

測定時の操作は、搭載したパソコン等により運転席で制御できるため、従来のベンケルマンビームによる測定のような通行車両による危険性は少ないが、通常、供用中の道路を測定することが多いため、接触・追突

など交通事故のないように留意しておかなければならない。

測定データの記録は、通常フロッピーディスクの形で持ち帰り、後日データの整理や解析を行う。その場合、測定結果の整理は、表-1に示すような項目について整理しておくことが望ましい。

表-1 測定結果の整理項目

測定年月日、測定時刻
測定路線名
測定箇所（上下線の別、測点、舗装種類等）
測定条件（センサ位置と個数、天候、温度等）
各測点の測定結果（荷重、各センサのたわみ値）

## 3. 測定区間

### 3.1 測定区間の考え方

管理する道路舗装の補修には、図-1<sup>3)</sup>に示すように

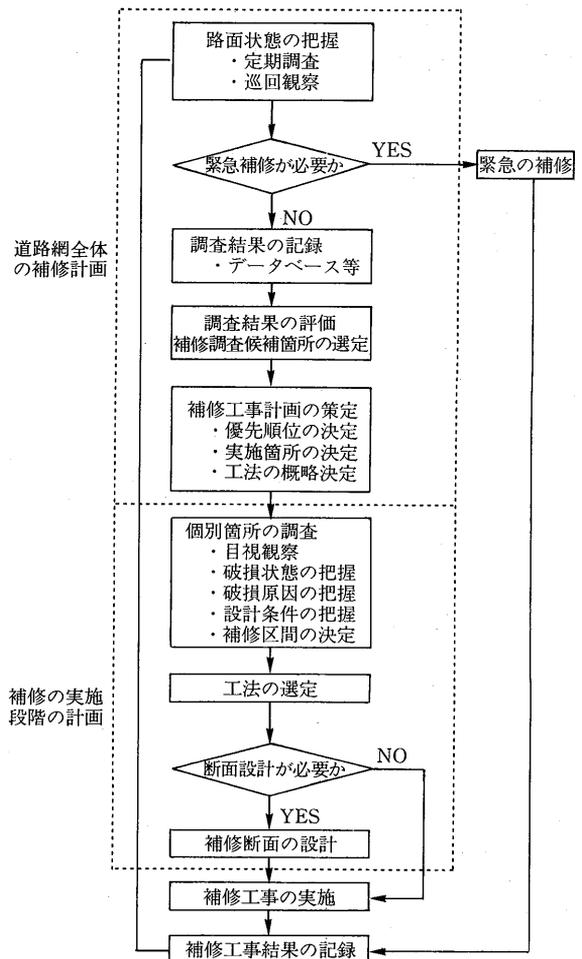


図-1 補修の手順

ネットワークレベル、すなわち道路全体の補修を計画する段階と、プロジェクトレベルである選定された箇所を個別に実施計画する段階、および補修工事を実施する段階とがある。

FWD測定により得られるたわみデータや舗装構成層の弾性係数は、いずれのレベルのデータとしても有効に利用できる。現在は、主として既設舗装において選定された箇所の調査を行い、たわみから支持力や舗装構成層の弾性係数などを求めることにより既設舗装の力学特性値を把握し、破損原因の確認や補修工法の選定などを行うための資料として利用されている。

FWD調査を実施するにあたっては、何等かの補修が必要であるとされる対象箇所において、比較的均質な解析単位区間を抽出することが重要であり、このことは補修区間を決定する場合についても同様である。均質な単位区間とは、路床条件、舗装構成、使用材料などが同一である区間を云い、表-2に示すような舗装の供用性に及ぼす各因子を用いて決定することができる。その一例を図-2に示す。これらの均質区間は、舗装マネジメントシステム(PMS)を実行する上でも最も基本的なものであり、これは維持修繕工事の区間として継続的なデータとなる。

表-2 収集する必要がある情報

当初の設計条件
舗装構成(厚さ, 材料性状等)
交通量, 軸重(輪荷重)
補修履歴
路面性状
路床

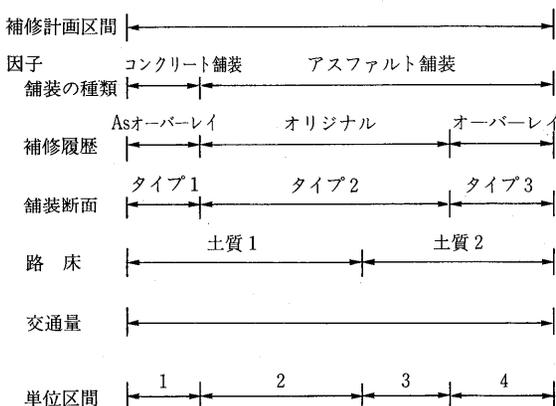


図-2 単位区間の選定方法の一例

FWD測定は、このような単位区間を考慮し測定箇所、測定延長の選定を行う。そのため、FWD測定の事前調査として既存資料の収集を行い、既存資料がない場合は、現地調査により状況の確認を行うことが大切である。FWD測定後のデータ解析においては、質の異なった区間ごとに解析・評価を行うことが重要であり、また、補修の実施延長を判断する上でも必要となる。そのため表-2に示す資料はできる限り収集を行う。

さらに、同一構成の舗装においてもひびわれ、わだち掘れ等の路面性状に違いが生じていることもある。そのため、路面性状からみた破損の程度に応じてさらに区間を分類し、破損の程度の異なる区間においてFWD測定を実施する。図-3<sup>5)</sup>はその一例を示すもので、本図において測定を行っていない区間は、同じように分類された測定区間と同様であるとみなしている。

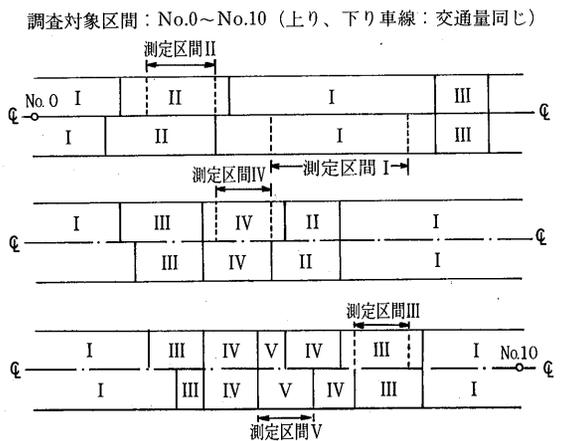


図-3 区間の分類による平面図の一例

### 3.2 累積差による区間分類

同一舗装構成と思われる区間のたわみデータにおいて、大きな変動を生ずる場合もある。これらは、既存資料の不備などから不適切な区間分類にも起因するが、たわみの変動について次のような点について注意しておく必要がある。

1つは単位間変動 (between unit variability) で、これはある区間の中で類似したたわみを示す単位区間によるものであり、これらの単位間で大まかな境界線が引かれる。もうひとつは、各单位内のバラツキであり、単位内変動 (within unit variability) と呼ばれる。この単位内変動は補修断面の設計などにおける信頼性に影響する。この単位間と内部のバラツキを十分に考慮しておかなければ、補修断面の設計などにおいて有効なデータとならないこともある。

次に、FWDたわみのように縦断方向にプロットされたデータを単位間変動を考慮した区間に分類する手法として累積差法がある<sup>6)</sup>。これは、例えば載荷板中心のたわみのプロットを縦断方向につないだ場合、ある距離におけるその曲線下の面積と、同一距離での平均面積との両者の差を累積差 $Z_x$ とし、横軸方向にとったとき、単位の境界線はその勾配 ( $Z_x/x$ ) が変化したときに生ずるという数学的事実に基づくものである。

図-4の(a)は、ある延長における測定値が連続で一定値を持っていると仮定したものである。(b)は(a)において $x$ と測定値 $r$ に囲まれる面積を累積した値を示す直線であり、点線は測定値 $r$ の平均値から、実線は測定値 $r_1, r_2, r_3$ から求めたものである。この図から分るように、測定値が大きく変化しているところでは実線の傾きの変化がみられる。これをさらに明確にするため、点線と実線で囲まれる面積(点線より下側は負、点線より上側は正)を $x$ 軸方向に累積した値を示したものが(c)である。すなわち、(c)において直線の傾きの符号(正、負)の変化点が、測定

値の変化がみられる近傍の点となる。

図-4(c)の直線の式は次のように求められる。

$$A_x = \int_0^x r dx \quad (1)$$

$$\bar{r} = \frac{\int_0^{x_1} r_1 dx + \int_{x_1}^{x_2} r_2 dx + \int_{x_2}^{x_3} r_3 dx}{L_p} = \frac{A_T}{L_p} \quad (2)$$

$$\bar{A}_x = x \cdot \bar{r} \quad (3)$$

ここに、 $A_x$  : ある $x$ における累積面積

$\bar{r}$  : 測定値の平均値

$L_p$  : 終点

$A_x, \bar{A}_x$ が求められれば、累積差 $Z_x$ は次式から得られる。

$$Z_x = A_x - \bar{A}_x \quad (4)$$

この $Z_x$ を $x$ 軸方向にプロットしたものが図-4(c)である。

図-5にたわみ測定結果の一例を示す。図-5(a)の $D_0$ の値から得られる累積差をプロットしたものが図-5(b)である。本図のプロットにより、傾きの変化に基づき区間を分けたものが(a)の①、②に示す区間であり、舗装構成が同一であってもたわみの変動の異なる2つの区間が見いだされる。

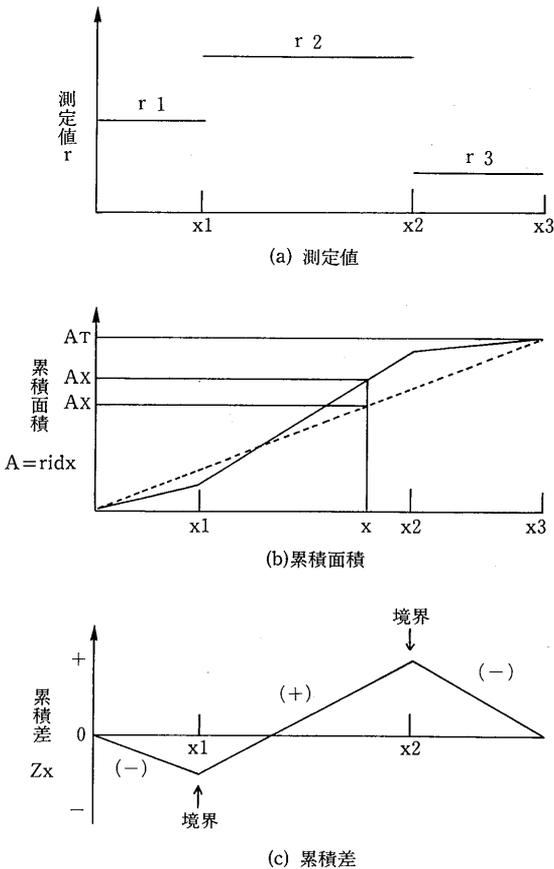
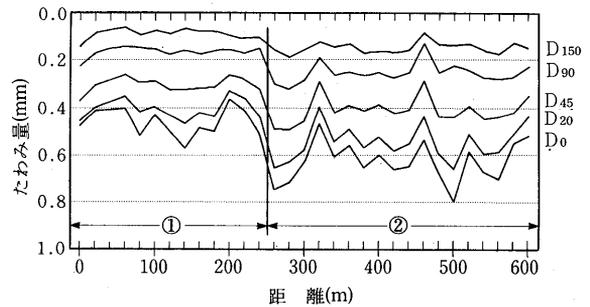
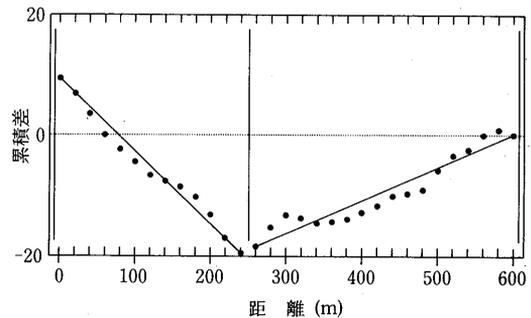


図-4 累積差法の概念



(a) たわみの縦断図



(b) 累積差のプロット

図-5 たわみ測定結果の一例

#### 4. 測定頻度

同一舗装構造を持つ均質区間内においてたわみ測定を行うとき、同一の舗装構造であっても、測定されるたわみは路床の不均一性、層厚および締固め度の変動などの理由によりバラツキ、すなわち区間内変動を示す。そのため、測定頻度や代表値を統計的に検討する場合、区間内でのたわみの母集団が正規分布をするかどうか確認を行っておく必要がある。笠原らは、美々試験道路において100地点のFWD測定を行い、たわみ

の分布の検討を行っている<sup>7)</sup>。その結果を図-6に示す。本図は、載荷板中心のたわみ $D_0$ 、および $D_{300}$ 、 $D_{750}$ のたわみの分布図である。これらの結果において、 $\chi^2$ 検定により測定たわみの母集団が正規分布を示すことが確認されており、区間内の測定たわみは正規分布すると考えて問題ないと思われる。

次に、測定回数に関し、現在行われている方法および研究の代表的な例を一括して表-3に示す。測定間隔あるいは測定点数については、ネットワークレベル

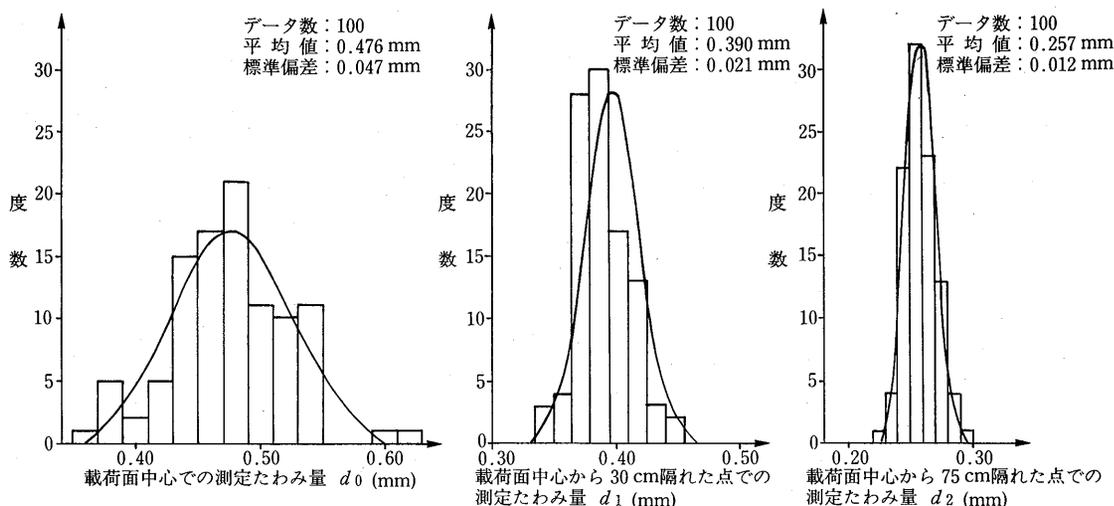


図-6 区間内の測定たわみの度数分布

表-3 たわみ測定頻度の一覧

	一地点の載荷回数	測定間隔
ASTMの方法 <sup>8),9)</sup>	2回以上繰り返す。どのセンサも変動が5%以上であれば5%以下になるまで測定を繰り返す。	全体の状況把握：150~300m オーバーレイ設計などの解析：30~150m 部分的な破損箇所の診断等：7.5~15m
Shell法 <sup>10)</sup>	2回の平均値とする。2回の測定値の差が大きな場合は3回目の測定を行い、3つのうち近い値の2個の平均をとる。	50m、もしくは25m、12.5mを推奨。 比較的均一な箇所では100~200mでもよい。
AASHTO設計法 <sup>9)</sup>	記述なし	区間の情報が少ない場合：90~150m 区間に関する正確な既往のデータがある場合：ランダムに10~15点 統計的な必要サンプリング数の図を表示。
Khoslaらの方法 <sup>11)</sup>	記述なし	30~50mの一定間隔を推奨。 必要サンプリング数は信頼限界10%、信頼度95%における統計値からも得られることを示している。
Gurpらの方法 <sup>12)</sup>	4回測定	50m間隔 少なくとも1区間10測点以上
Lyttonらの方法 <sup>13)</sup>	記述なし	ネットワークレベルでは、1区間5測点以上 プロジェクトレベルのオーバーレイ設計等では、30~90m さらに詳細な検討では、7.5~15m
笠原らの方法 <sup>14)</sup>	2回の平均値	必要サンプリング数は、実測データの変動係数から信頼限界5%、信頼度95%において16測点以上としている。
SHRPの方法 <sup>15)</sup>	4回測定を行うが、最後の1回はたわみ履歴を測定するためのもので、ピークホールドは3回。	7.5m（調査区間の測点数44）とする。

のように全体の状況を把握する場合と、均質区内における測定の場合とによってその考え方は異なってくる。本表から分かるように、ネットワークレベルでは100~300m程度の一定間隔で行われており、一方、補修工法の設計などにおいては当然それよりも短い間隔で測定が行われている。なお、SHRPの方法は、研究目的を主としているため測定点数は多くなっている。

1つの区間を代表するデータとしては、バラツキなどを考慮した統計的な面から、必要とするサンプリング数を認識しておくことも重要である。信頼度95%としたとき、母平均 $\mu$ の信頼区間を求める式より必要サンプリング数は次式で与えられる。

$$n \geq (1.96 \times CV/d)^2 \quad (5)$$

ここに、CV：変動係数，%

d：信頼範囲，% (=  $100 \times |\mu - X| / \mu$ )

種々の変動係数と信頼範囲におけるサンプリング数を表-4に示す。

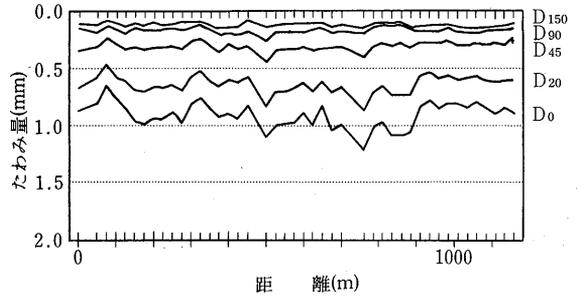
表-4 必要サンプリング数

変動係数 CV%	サンプリング数 n			
	d=5%	d=10%	d=15%	d=20%
10	16	4	2	1
20	62	16	7	4
30	139	35	16	9
40	245	61	27	15

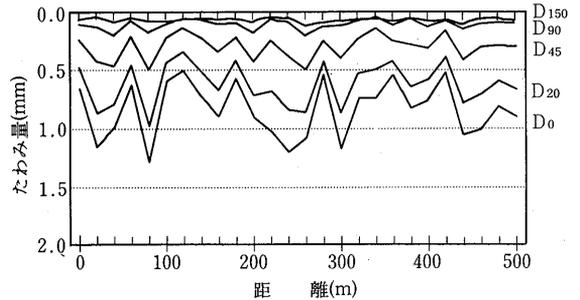
載荷板中心のたわみ $D_0$ についてみると、区間内における変動係数は一般に10~40%の範囲で変動していることが多い。また、AASHTOの設計指針においてもたわみの変動係数として15~45%の値を示している<sup>8)</sup>。

区間内での $D_0$ たわみの変動係数が異なるケースにおけるたわみの測定例を図-7に示す。本図における(a)の例は供用後1年程度の路面性状が良好な状態の舗装で、(b)はひび割れがかなり生じている舗装である。(c)は変動係数が50%と極端な例であり、ほぼ全面にひび割れがみられ非常に路面性状の悪い舗装である。このように、新設舗装などのたわみの変動が少ない舗装では10%程度の変動係数が得られるが<sup>11)</sup>、供用中の舗装の場合20%前後の変動係数を示す場合が多い。

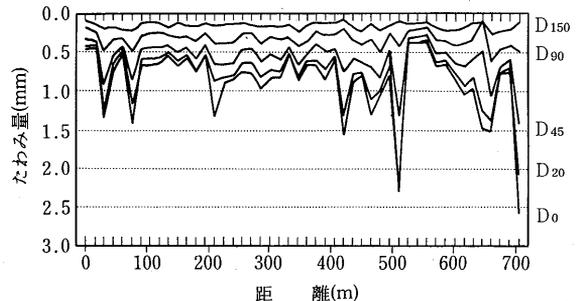
なお、信頼範囲をどの程度とするかはあまり明確でないが、1区間内の測定点数を著しく多くすることは測定に要する時間と費用が多くなり、実務上適切でないと考えられる。わが国においては、1区間内の測定点数として20点程度の測定が行われることが多く<sup>9)</sup>、その場合、20~30%の変動係数において10~15%の信頼範囲となる。したがって、この程度の信頼範囲を許容



(a)  $D_0$ の変動係数12%



(b)  $D_0$ の変動係数28%



(c)  $D_0$ の変動係数50%

図-7 変動係数の異なるたわみの測定例

するとすれば、通常の変動係数において一般的に行われている1区間20測点以上の測定は、目標として妥当なものと考えられる。測定間隔については測定点数に依存して決まってくるが、わが国においてはあまり長い延長の測定は少なく、10~50m間隔での測定例が多い。

また、1区間内において所定の点数をランダムに測定するかどうかについて、Shellの研究結果では、一定間隔での測定でもランダムな測定と同様な結果が得られること、ランダムに測定することは実務上困難であることから、一定間隔での測定を推奨している。

次に、一地点における測定回数としては、表-3に

みられるように2～4回の測定値が使用されている。なお、これらの値はいずれも載荷板が路面に接したときの最初の載荷によるたわみは予備載荷として破棄し、その後の載荷による測定値として採用したものである。さらに、前述の(5)式により必要サンプリング数を検討すると、一地点のたわみの変動係数を2～3%、信頼範囲を5%とすれば $n \geq 2$ が得られる。わが国においては、一般的には2回の測定の前平均値が使用されており<sup>17)</sup>、ほぼ妥当なものと思われる。

## 5. おわりに

現在、わが国においては各種のFWDが12台導入されており、今後さらに普及するものと考えられる。様々なFWD装置について精度がどの程度であるか、あるいは得られたたわみが同一レベルの精度を確保しているかなどを検討するため、各装置による共通試験も行われている<sup>2)</sup>。他方、アメリカにおいてはSHRP計画の1つとして長期供用性状の測定をFWDにより行っている。そのため、FWD装置に対するキャリブレーションセンターの設置に着手し、現在ではネバダ州、テキサス州、ミネソタ州、ペンシルバニア州の4箇所に設立されている<sup>16)</sup>。このような状況下において、わが国でもキャリブレーション方法の確立を含め、各FWD装置によるデータの共通性が確保できるように方法を検討していくことが必要であろう。また、FWDに関する測定方法についても標準化されたものがないため、検討していかねばならない課題と考えられる。

今後、舗装の補修はますます重要になるとともに、またPMSの導入などが必然的に検討されていくものと思われるので、FWDの果たす役割は極めて大きく、その効果的利用の推進が切に望まれる。

## — 参考文献 —

- 1) 丸山暉彦, 姫野賢治, 林 正則: FWDによる舗装診断システム, 舗装, Vol.23, 1988.11, P20
- 2) 舗装機能の評価技術に関する研究小委員会: 舗装機能の評価法, 土木学会, 1992.5, P33
- 3) (社)日本道路協会: アスファルト舗装要綱, 1992, P228
- 4) 菊川 滋, 笠原 篤: 舗装マネジメントシステムにおけるデータベースの役割と支持力データの利用, 道路, 1987.9, P53
- 5) 井原 務, 井上武美, 陶山武彦: アスファルト舗装の評価診断・修繕設計支援システムの開発, 道路建設, No.520, 1991.5, P44
- 6) AASHTO: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986
- 7) 岳本秀人, 笠原 篤: フォーリングウエイトデフレクトメータによるアスファルト舗装の構造評価とペイブメントマネジメントシステムへの利用(第1報), 北海道開発局試験所土木試験所月報, No.386, 1985.7, P12
- 8) ASTM D4694, Standard Test Method for Deflection with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, 1987
- 9) ASTM D4695, Standard Test Method for General Pavement Deflection Measurements, 1987
- 10) Claessen, A.I. and Ditmaesch, R.: Pavement Evaluation and Overlay Design-The Shell Method, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1987, P649
- 11) Khosla, N.P. and Ali, N.A.: A Mechanistic Method for Evaluation of Layer Modull and Overlay Design, ASTM STP1026, 1989, P355
- 12) van Gurp, C., Hoyinct, W., van de Streek, A., Thewessen, B.: Harmonisation of Falling Weight Deflection Evaluation Procedures, 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol.3, 1992, P380
- 13) Lytton, R.L., Germann, F.P., Chou, Y.J. and Stoffels, S.M.: Determining Asphaltic Concrete Pavement Structural Properties by Nondesructive Testing, NCHRP 327, 1990
- 14) Kasahara, A., Kubo, H. and Sugawara, T.: Estimation of In Situ Elastic Moduli of Pavement Structural Layer with Falling-Weight-Deflectometer Deflection Basin, 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1987, P590
- 15) National Research Council: SHRP LTPP Manual for Testing, Ver1.0, 1989
- 16) National Research Council: SHRP FWD Calibration Centers Open for Business, FOCUS, 1992

# FWDによる舗装診断の実例

丸山 暉彦\*

## 1. はじめに

FWDのたわみ曲線から逆解析によって弾性係数を求め、これから舗装の健全度を評価するのが、FWDによる舗装診断の本来の方法であるが、これについては、本誌のどこかで述べられているであろうから、本稿では逆解析によらない舗装診断の実例について述べることにする。

FWD測定を実施すると、通常2種類のデータが得られる。一つは1地点におけるたわみ曲線、もう一つは、ある区間を数メートルおきに連続して測定した結果を示す、たわみプロフィールと呼ばれるデータである。この2種類のデータをじっくりと眺めるだけでかなりのことがわかる。

## 2. FWDたわみ曲線

まず、荷重点直下のたわみ $D_0$ の値は、舗装構造が堅固なほど小さい。 $D_0$ の値が同じでもたわみ曲線の形状が異なっていれば、舗装内部の各層の厚さや硬さは異なるが、全体として、強い舗装は $D_0$ が小さく、弱い舗装は $D_0$ が大きい。アスファルト舗装についていえば、ひび割れの入っていない舗装についての $D_0$ の値は、おおよそ表-1に示す値以下であることが、これまでの多くの測定結果からわかっている。従ってFWD測定結果から、その舗装が健全かどうかは、この表の値を参考にして判断する。温度によってたわみの大きさも変化するが、その変化の大きさは舗装構造が異なってもあまり変わらず、路面温度が1℃上昇するとたわ

表-1 路面状態の良い舗装の荷重点直下のたわみ

交通量区分	荷重点直下のたわみ $D_0$
A 交通	0.9 mm以下
B 交通	0.6 mm以下
C 交通	0.4 mm以下
D 交通	0.3 mm以下

みは0.01mm大きくなる。この規則を利用して20℃におけるたわみ量に換算し表-1を適用する。ただし、この表の値は厳密なものではなく、舗装の健全度は、他のデータなども参考にした上で総合的に評価するものである。

図-1に強い舗装と弱い舗装のたわみ曲線を示した。三角印が強い舗装(A)のもので、圧密沈下の続く盛土上でオーバーレイにオーバーレイを重ね、ついにアスコン層の厚さが80cmに達したところにおけるFWDたわみ曲線である。 $D_0$ は0.1mm以下で、FWDの錘りを落としてもビクとも動かないという形容がふさわしい。丸印は超軟弱地盤上のB交通の舗装(B)で、ある試験のために、わざと $T_A$ を不足させた舗装におけるたわみ曲線である。CBR=2、 $T_A=19$ cm、アスコン層の厚さ=5cmである。舗装要綱で必要とされている $T_A$ は29cmであるから、当然この舗装はすぐに破壊されるであろう。荷重点直下のたわみ $D_0$ は2mmに達しており、一部のFWDでは測定限界値を越えてしまう。測定は、施工してから20ヵ月後に実施しており、かなりのわだち掘れと縦断クラックが発生していた。

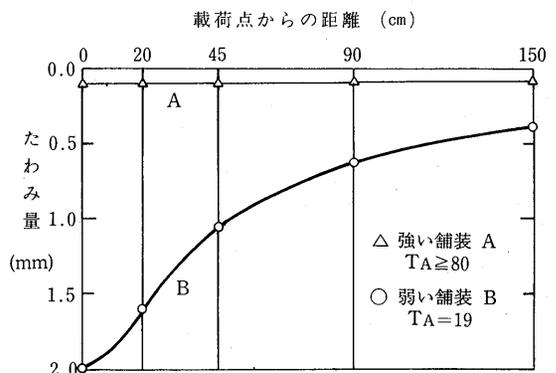


図-1 たわみ曲線の比較(強い舗装と弱い舗装)

過去6年間、精力的にFWDデータを収集してきたが、その中で舗装(A)は強い方の、舗装(B)は弱

\*まるやま てるひこ 長岡技術科学大学建設系教授

い方のそれぞれ横綱級である。

載荷点から  $r$  だけ離れた位置におけるたわみ  $d_r$  と路床の弾性係数  $E_{sg}$  の関係は、 $P$  を荷重、 $\mu$  をポアソン比として

$$E_{sg} = (1 - \mu^2) P / \pi r d_r$$

で表される<sup>1,2)</sup>。  $P = 5 \text{ t}$ 、 $\mu = 0.3$ 、 $r = 150 \text{ cm}$  とすると、 $E_{sg} = 96 / d_{150} \approx 100 / d_{150}$  となる。すなわち、FWDで測定中いつでも、簡単な計算によって路床弾性係数を求めることができる。さらに

$$\text{CBR} = E_{sg} / 100 = 1 / d_{150} \quad (\text{CBR} \leq 30 \text{ の場合})$$

$$\text{CBR} = E_{sg} / 50 = 2 / d_{150} \quad (\text{CBR} > 30 \text{ の場合})$$

の関係から大雑把であるが、路床のCBR値を知ることができる。例えば、図-1の舗装(A)では  $d_{150} = 0.08 \text{ mm}$  だから路床CBRは  $1 / 0.08 = 12.5$  であり、舗装(B)では  $d_{150} = 0.4 \text{ mm}$  だから路床CBRは  $1 / 0.4 = 2.5$  である。これまでの測定の経験からFWDで求めたCBRが2より小さくなることは滅多にない。これは路床土が、上部にある舗装の死荷重を受けて拘束されていることと、乱されない状態にあることが原因であろう。

また、たわみ曲線において  $d_{150}$  から  $d_0$  に至る部分の傾きの大小で路盤の強弱を推定することができる。舗装(A)は加熱アスコン層が80cmを占めているから、強力な路盤層をもっているのと同じであり、たわみ曲線の中間部分の勾配はほとんどゼロである。舗装(B)の路盤は、舗装厚不足のために、くたびれた粒調碎石とクラッシャーランであり、たわみ曲線の中間部の傾きが大きい。

### 3. たわみプロフィール

図-2は、長さ400mの区間を15m間隔でFWDたわみを測定し、各センサーの示す値を道路進行方向に沿ってプロットしたもので、たわみプロフィールと呼ん

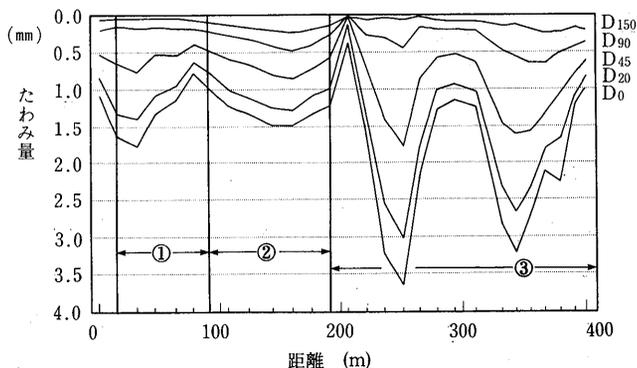


図-2 たわみプロフィールの一例

でいるものである。これによって舗装構造の変化点が明確になることが、前述の雑賀氏によって述べられている。路面の破壊の程度が大きいほど  $D_0$  の変動係数が大きくなることも述べられている。その他にも、 $D_{150}$  だけのプロフィールを眺めていれば、路床CBRの変動する様子がよくわかる。区間②は区間①、③に比べて路床の弾性係数が小さい。CBRに直すと区間①のそれは15であるのに対し、区間②では5しかない。

たわみが局部的に大きくなる場所はひび割れがあるのが普通であるが、場合によっては空洞のある可能性もある。急にたわみが小さくなる場所には、埋設物のある可能性が高い。また、 $D_{150}$  と  $D_{90}$  の間、あるいは  $D_{90}$  と  $D_{45}$  の間が、狭くなったり広くなったりしていれば、路盤の強さが変動していることになる。

図-2に示した区間①および②は路面性状の良好なところで、区間③のたわみの大きい2ヵ所に亀甲状のひび割れが生じている。200m地点には深いところに埋設物がある。

それ以外のところは  $D_0$  が1mm以上あり、現在は路面性状が良好であっても、近い内にひび割れが発生するであろう、などというようなことが読み取れるのである。

### 4. おわりに

逆解析弾性係数の信頼性にはまだ若干の問題点があり、FWD活用の障害となっている。これを克服するには、逆解析一点張りで行くのではなく、本稿で述べたような熟練者の直感を併用するようなエキスパートシステムを構築することが必要ではなからうか。いつかは、道路舗装診断士のような国家資格ができて、それを持っていれば高給が取れるようになってほしい。FWD測定に熟練すると、データなど見なくても、錘りを落としたときの振動を足の裏から感じて、舗装構造の良し悪しを判定できるようになるとい

#### 参考文献

- 1) P.Ullidtz : Pavement Analysis, Elsevier, 1987, p.264.
- 2) AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO 1986, p.III-86.

# FWDによる舗装診断の実例

## ～空港舗装への適用～

八谷 好高\*

### 1. はじめに

わが国の空港舗装の管理システムは、まず路面性状評価により補修の必要性を判断して、次に補修が必要とされたものについて構造評価を行い、そして構造上の問題の有無に応じて適切な補修方法を選定して、その構造設計を実施するというものである<sup>1)</sup>。

このうち、路面性状調査については昭和57年以来、第1種空港と第2種空港で3年ごとに実施されてきている。また、構造評価法としても、アスファルト舗装についてはダイナフレクトによる非破壊評価法<sup>2)</sup>が採用

されており、コンクリート舗装に対してはFWDを用いたもの<sup>3)</sup>が提案されている。以下では、まず、このFWDによる空港コンクリート舗装の非破壊評価法についての概要を示してから、空港アスファルト舗装へのFWDの適用性について述べる。

### 2. コンクリート舗装への適用

FWDによる空港コンクリート舗装構造の非破壊評価法は、そのフローチャートを図-1に示すように、以下の3つから構築されている。

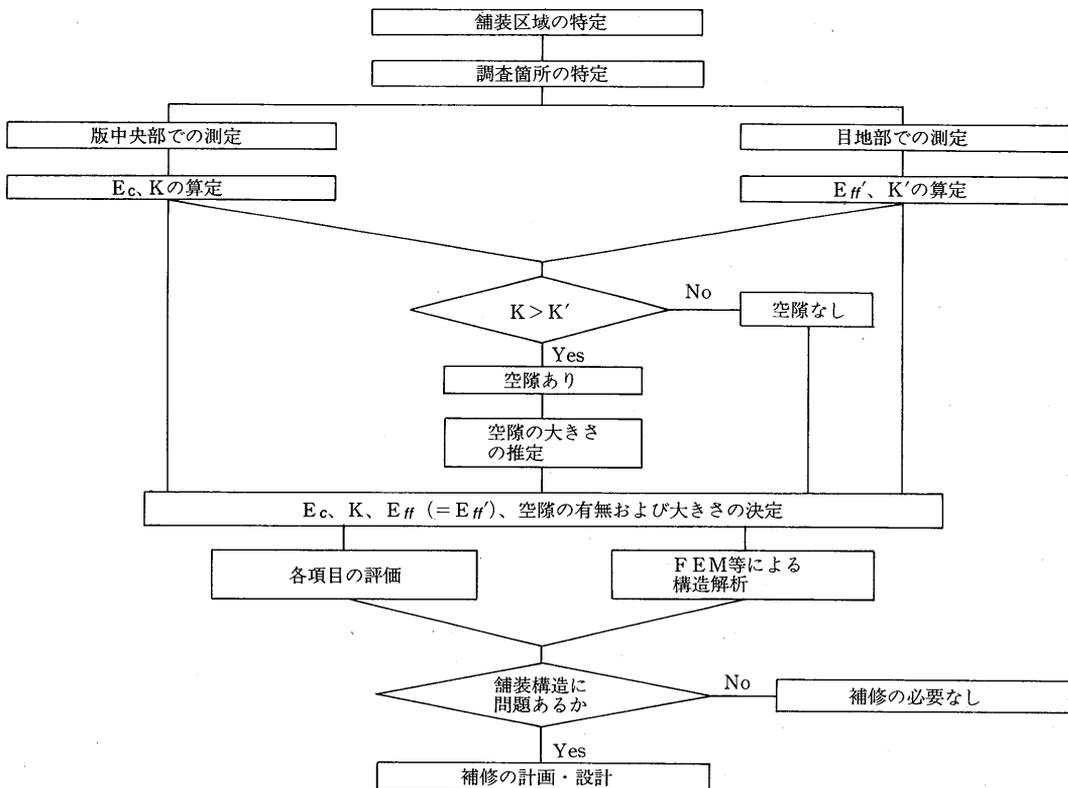


図-1 空港コンクリート舗装の構造評価法のフロー

\*はちや よしたか 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室長

- ① コンクリート版中央部での測定値からのコンクリートの弾性係数 ( $E_c$ ) と路盤支持力係数 ( $K$ ) の推定
  - ② 目地部での測定値からの目地の荷重伝達機能の定量化
  - ③ 版中央部, 目地部での測定値からのコンクリート版下の空隙の有無, 大きさの推定
- ①の逆計算には, Westergaardの中央部載荷公式を使用して, たわみの実測値と計算値の差の平方和が最小になるようにして $E_c$ と $K$ を求めている。②の場合は, 載荷板を目地近傍に設置した状態で測定を実施し,  $d_u / \{ (d_1 + d_u) / 2 \}$  ( $d_1$ は載荷板中心のたわみ,  $d_u$ は $d_1$ に対応する非載荷側の版のたわみ) により, 荷重伝達率 ( $E_{tr}$ ) として定量化している。③については, 測定値同士の相対比較, すなわちたわみの大きさにより判断している。

測定例として, 図-2には $K$ の経時変化を, 図-3には最大たわみ(載荷板中心)と空隙の大きさの関係を示す。これらの結果から, FWDの空港コンクリート舗装に対する適用性は高いと判断している。

### 3. アスファルト舗装への適用

ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装の構造評価では, 測定たわみを基準たわみと比較することが基本である。この場合, 測定値, 基準値とも標準温度(20°C)のものに換算するのが原則であり, 基準値としては数多くの空港での実測結果に基づいて破損のある舗装と健全な舗装との間に引かれた境界線が用いられる(図-4)。そして, 調査対象となる舗装の(新たな)設計荷重に対する基準たわみよりも実測たわみが大きければオーバーレイが必要となる。その厚さの算定には, 既設舗装を2層弾性体と考えて実測たわみから逆解析した弾性係数を使用して, オーバーレイされた場合を3層構造と考えてたわみを計算し, それが基準値と等しくなるときを所要厚としている。

この手法はFWDを使用した場合にも適用できるが, FWDによるアスファルト舗装の構造評価については実

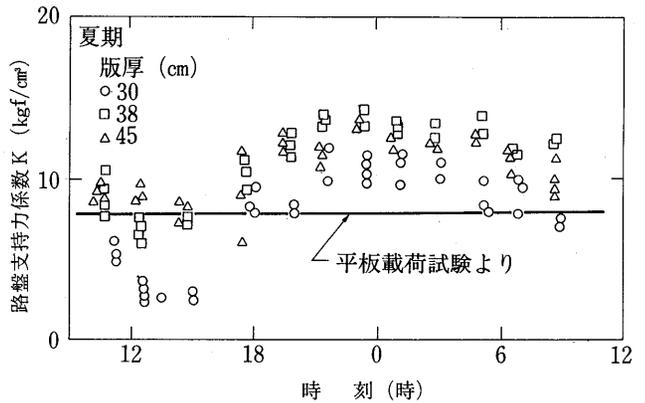


図-2 路盤支持力係数の時間的変化

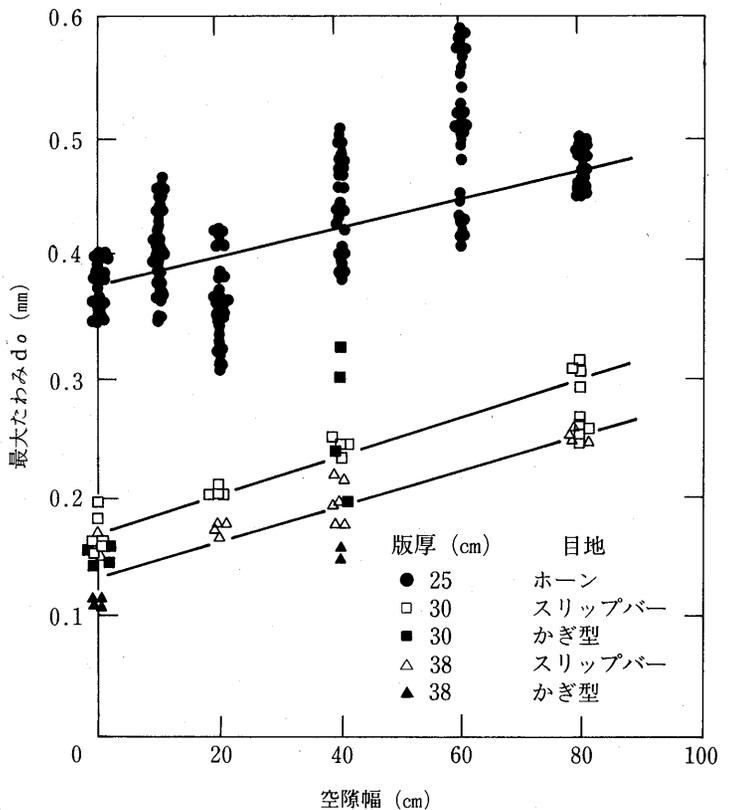


図-3 空隙幅と最大たわみの関係

績も少なく, たわみの温度補正, 基準たわみの設定といった点がまだ確立されていないのが現状である。そこで, ここでは現在までにFWDがアスファルト舗装の構造評価に使用された事例を示すにとどめたい。

路床が異なるだけで表基層, 路盤は同一な2種類の舗装でFWDによるたわみ測定が実施された<sup>4)</sup>。路床としてA区画では山砂, B区画では建設残土の消石灰安

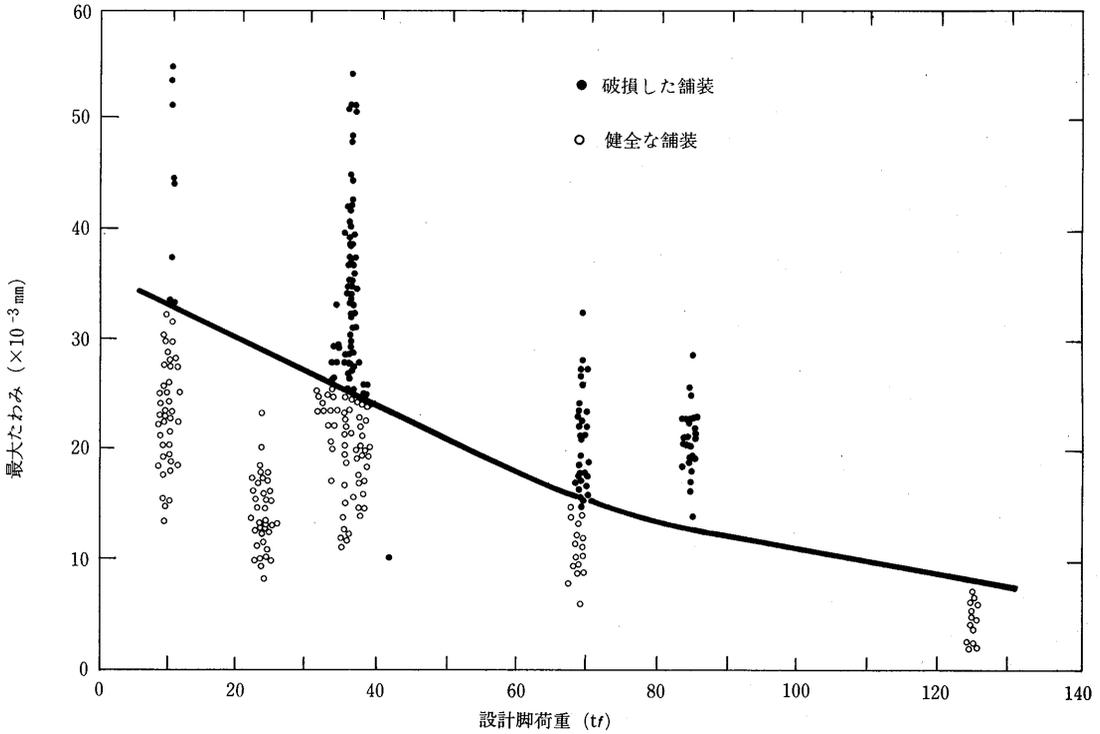


図-4 ダイナフレクトの基準たわみ

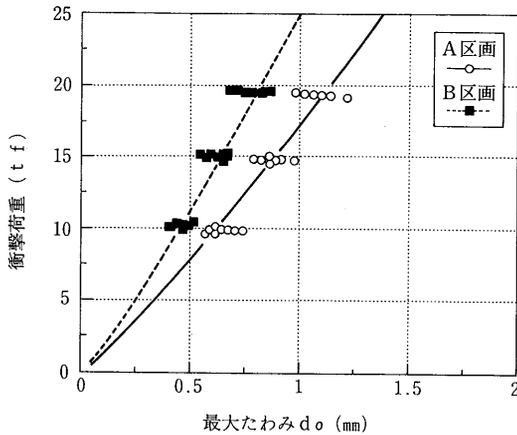


図-5 区画によるFWDたわみの違い

表-1 推定された弾性係数  
(単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

区画	層	荷重 (tf)		
		10	15	20
A	表層・基層	59000	77000	83000
	路盤	2300	2300	2700
	路床	430	510	520
B	表層・基層	54000	70000	95000
	路盤	2300	2400	2000
	路床	1500	1700	2300

定処理土が用いられているが、強度としてはB区画のほうが大きかった。測定されたたわみが図-5に、このたわみからBISARをサブプログラムとして含んだ逆解析プログラムを使用して求められた各層の弾性係数が表-1に示されている。たわみ、弾性係数の両者ともに、路床の違いが明白に現れており、B区画では載荷版中心のたわみ( $d_0$ )は小さく、弾性係数は大きな値が得られた。

供用中の空港アスファルト舗装において補修工事の前後で測定されたFWDたわみ( $d_0$ )が図-6に示されている。測定は夜間に実施され、補修後測定時の表面温度は補修前のもに比べて4~10℃低いものとなっていた。ダイナフレクトたわみの温度補正手法<sup>2)</sup>に従えば、これは0.93~0.82倍になるが、それを考慮に入れても補修によるたわみの減少が明かであり、補修することによって支持力が回復されたことがわかる。

これらの事実は、FWDによって測定されたたわみ、ならびにそれからの逆解析によって推定された弾性係数を用いれば、舗装の構造評価が可能であることを意味している。このほか、FWDによるたわみ測定と平板載荷試験結果との比較から、平板載荷試験に代わって測定時間の短いFWDを使用できる可能性のあることも認められている<sup>4)</sup>。

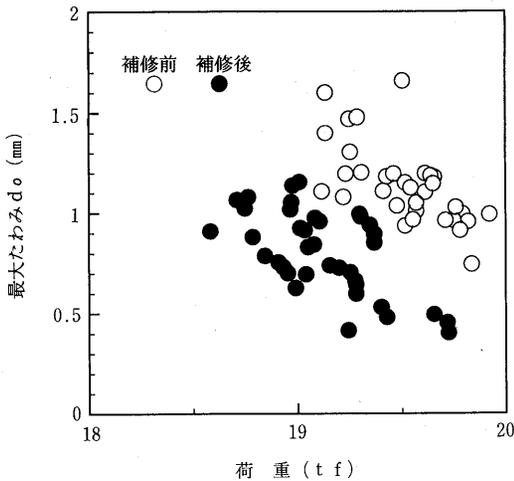


図-6 補修前後のFWDたわみ

弾性係数を推定するという手法が主流である。これに対して、空港アスファルト舗装の構造設計には基本的にCBR法が用いられている。したがって、舗装の補修設計とFWDによる構造評価手法とを有機的に結びつけるためには、構造設計法として弾性理論によるものが確立されることが急務となろう。

空港舗装の構造評価は、航空機の大型化ともなつて舗装の構造強化が必要とされるときに実施される場合が今まで大部分を占めていた。しかし、航空機の大型化が一段落したこともあり、今後は、一定荷重の繰り返し支配因子となるPMSが管理・運用の基本となるものと考えられるので、FWDによる構造評価においては舗装の残存寿命の推定が最重要課題であると認識している。その際には、図-5、表-1にみられるように、荷重の違いがたわみ、推定された弾性係数に影響を及ぼしていることから、実際の大きさに近い荷重を載荷できるFWDを用いることが必要となろう。

#### 4. 今後の課題

舗装の補修設計の前段を成すFWDによる構造評価法では、上記のように、舗装を弾性体とみなして各層の

#### — 参考文献 —

- 1) 運輸省航空局：空港舗装補修要領（案），95p，1984。
- 2) 佐藤勝久，福手 勤：ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装強度評価とかさ上げ厚設計，土木学会論文報告集，第303号，pp.109-118，1980。
- 3) Yoshitaka Hachiya, Katsuhisa Sato : Nondes-
- 4) 梅野修一，八谷好高：FWD試験と平板載荷試験の比較，土木学会第47回年次学術講演会講演集第5部，pp.52-53，1991。

structive Evaluation Method of Concrete Pavement by FWD, 土木学会論文集, 第420号, V-13, pp.303-309, 1990.

## 石油学会新潟大会

— 次代につなぐ資源と環境 —

主催 社団法人 石油学会  
 協賛 化学工学会関東支部新潟地方化学工学懇話会  
 講演会  
 日時 平成5年6月24日(木) 10:00~16:30  
 会場 郵便貯金会館 (〒951 新潟市川岸町2-1-7 電話 025-232-0101(代))  
 新潟駅下車(万代口からタクシー約12分, バス便もあり)  
 参加費 正会員 2,000円, 学生会員 1,000円, 維持会員会社の非会員 4,000円  
 非会員 6,000円, 学生非会員 2,000円

問い合わせ先：東京都豊島区西池袋3-27-12  
 社団法人 石油学会 ☎03-3988-2961

# FWDの今後の展望

笠原 篤\*

## 1. 海外における動向

### 1.1 FWDの発展過程

今から30年前の1962年が、アスファルト舗装の理論的な構造設計の実質的なスタートであったと考えられる。というのは、それは第1回のアスファルト舗装の構造設計に関する国際会議が1962年にミシガン大学にて開催されたことにある。この時点までに、アスファルト舗装の研究に影響を与えた4大成果があった。それらは、D. M. Burmisterの理論<sup>1)</sup>、WASHO試験道路におけるベンケルマンビームを用いたたわみ測定<sup>2)</sup>の発展<sup>3)</sup>、舗装のたわみと疲労破壊に関するF. N. Hveemの研究<sup>4)</sup>、AASHO試験道路<sup>5,6)</sup>であった。

FWDの研究は1963年ころからデンマークにおいて始まり、その成果が発表されたのは、第2回アスファルト舗装の構造設計に関する国際会議(1967年8月、ミシガン大学)における討議の場であった<sup>7)</sup>。続いて、第3回アスファルト舗装の構造設計に関する国際会議(1972年9月、ロンドン)にて論文発表され<sup>8)</sup>、さらに1976年の第51回AAPTの年次会議へと進んだ<sup>9)</sup>。また、当時代は、力学理論を用いたアスファルト舗装の層構造解析が、コンピューターの出現により飛躍的に発展していた<sup>10)</sup>。さらに、アスファルト混合物の疲労性状については、1955年F. N. Hveem<sup>4)</sup>の研究に始まり、続いて、1970年代のC. L. Monismith<sup>11)</sup>、P. C. Pell<sup>12)</sup>らの研究に引き継がれていった。

道路と空港の支持力に関する第1回の国際シンポジウムがノルウェイ工科大学の主催により、1982年に開催された。その論文集<sup>13)</sup>には112編の論文が掲載されているが、その内FWD関係の論文は9編であり、約8%であった。それらの論文もオランダ、デンマーク、スエーデンからのものであった。特に、フニックス、カーブ、ダイナテストなどのFWDメーカーの論文が身受けられた。第2回は、1986年にイギリスで開催され、61編中7編がFWD関係であり<sup>14)</sup>、その比率は11.5%で

あった。論文発表国も前述国にイギリス、サウディアラビア、イタリア、日本が加わった。第3回は、1990年にノルウェイ工科大学で開催され、110編中28編がFWD関係であり<sup>15)</sup>、その比率は25%にも昇った。さらに、論文集1168ページのうち、FWDの用語が出現するページは90にもなっていることから、約13ページ毎にFWDが出てくることになる。また、論文発表国はさらに世界に広がり、北欧3国、アメリカ、マレーシア、中国、ボツワナなどであった。

その間、舗装構造解析も層弾性理論、有限要素法、粘弾性理論、動的応答解析など多くの発展が見られ、さらに、アスファルト混合物の疲労性状についての研究も進み、舗装の理論的設計法が確立し始めた。それらの成果は、第4回以降のアスファルト舗装の構造設計に関する国際会議の論文に反映されている<sup>16-18)</sup>。しかし、様々な環境条件下における舗装構成層の現地での物性が明確でないことが、舗装の挙動を舗装構造解析で説明しきれないという問題点をかかえていた。

### 1.2 FWDたわみの利用

実際の走行荷重にシュミレートしたたわみが測定できることがFWDの最大の長所であることから、逆解析に用いるインプットデータとして、FWDが最良のたわみ測定装置であるとの認識が世界中に広まった。FWDのメーカーとしては、フニックス、カーブ、ダイナテスト社などがあり、今日、全世界で300台程度普及している。1987年にはフォーリング・ウェイト・タイプの衝撃荷重装置によるたわみに関する標準試験法としてASTMに規格化されている<sup>19)</sup>。

前述のように、舗装の挙動を舗装構造解析のみでは説明しきれないことから、舗装構造解析手法の発展と相まってFWDによるたわみ測定値から、舗装構成層の弾性係数や層厚を求める逆解析が注目され始めた。それを背景にして、ASTMでは、1988年に舗装の非破壊試験と弾性係数の逆解析に関する第1回の国際シンポ

\*かさはら あつし 北海道工業大学土木工学科教授

ジュウムが開催され、その論文がSTP1026として出版された<sup>20)</sup>。

しかし、逆解析においてもいくつかの問題をかかえている。たとえば、

- ① FWDで動的たわみを測定しているのに、逆解析に静的弾性理論を用いている、
- ② たわみは無限深さまで影響しているとは考えにくいことから、路床下部の不動層の存在を仮定するか否か、

などである。それ故、逆解析を行う場合に用いる理論も層弾性理論以外に、有限要素法、粘弾性理論、動的応答解析などが用いられてきている。

### 1.3 SHRPにおけるFWD

1987年から研究が始められたSHRP (Strategic Highway Research Program) も昨年で終了し、1993年3月にはオフィスも閉鎖される予定である。しかし、舗装の長期供用性 (LTPP: Long-Term Pavement Performance) については、その性質からして、連邦道路局 (FHWA) に引き継がれることになっている。SHRPにおいて採用されたたわみ測定機はFWDであり、たわみ測定の詳細は、LTPPの試験区間について、FWDデータから逆解析される舗装構成層の弾性係数の変化を統計的に評価し、舗装構成層材料の変化を定量化することであった<sup>21)</sup>。SHRPの研究成果は既になりに出されているが、FWDに関係するものとして、下記に示した試験法のマニュアル、FWDデータのチェック・加工・処理に関する各種ソフトがある。

- ・ The SHRP-LTPP Manual for FWD Testing.
- ・ FWDSCAN
- ・ FWDCHECK
- ・ FWDREFCL
- ・ FWDICAL

また、FWDの試験機としてのキャリブレーションを行う必要性から、全米に4箇所のキャリブレーションセンターを建設している。

### 1.4 FWDの将来

舗装に係わる研究のすべては、最終的にはより信頼性の高い舗装マネジメントシステム (PMS) を構築することに向けられる。またPMSは多くのサブシステムから構成されていることから、各々のサブシステムを信頼性の高いものにする必要がある。その内、たわみ測定データを用いたアスファルト舗装の層構造解析サブシステムは図-1のようなフローで示される<sup>22)</sup>。このサブシステムも多くの要素から構成されている。そ

の中で、FWDは、舗装の構造評価および設計のための有力な非破壊試験機 (たわみ測定) として、世界的に利用されてきている。しかし、現状のFWDにも次のような改良点が考えられる。

- ・ たわみセンサーの分解能および精度の向上
  - ・ 等分布荷重がかけられる載荷板の開発
  - ・ たわみおよび荷重のキャリブレーション法の確立
- さらに、測定点の自動位置合わせ、アスファルト混合物層内の温度測定、コンクリート版目地部の荷重伝達測定などの機構の開発も必要となってくる。

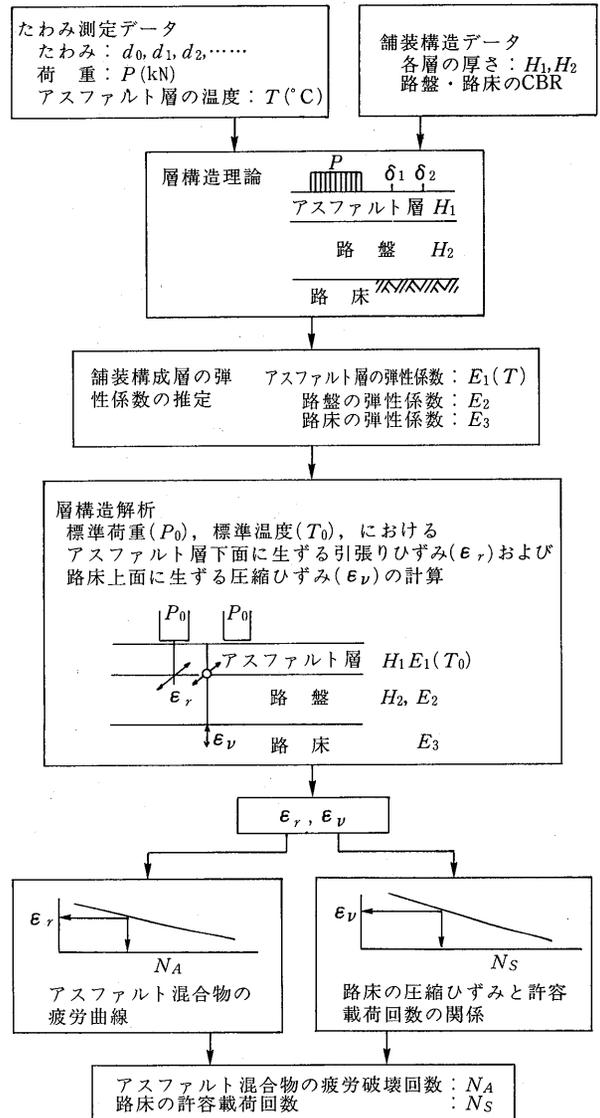


図-1 層構造解析サブシステム

高速走行しながらたわみを高精度で測定する方法が開発されるまでは、FWDはさらに世界中に普及されるものと思われる。すなわち、図-2に示されているよ

うなアスファルト舗装の構造解析および設計のフレームワーク<sup>23)</sup>が、根元から覆る事態が生じない限り、たわみ測定は不可欠な事項となっている。

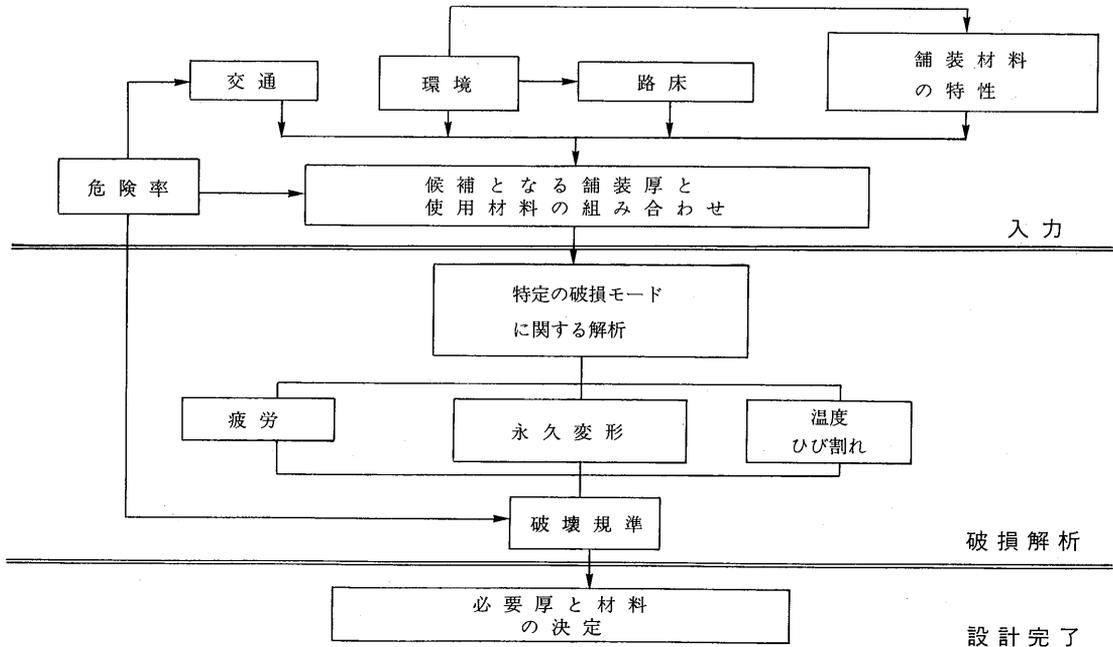


図-2 アスファルト舗装の解析と設計に関する単純化されたフレームワーク<sup>23)</sup>

— 参考文献 —

- 1) Burmister D. M., : The General Theory of Stresses and Displacements in Layered System, Journal of Applied Physics, Vol.15. 1945.
- 2) Special Report 18 : The WASHO Road Test, Part 1 : Design, Construction and Test Procedures, HRB, 1954.
- 3) Special Report 22 : The WASHO Road Test, Part 2 : Test Data, Analysis, Findings, HRB, 1955.
- 4) Hveem F. N., : Pavement Deflections and Fatigue Failures, Bulletin 114, HRB, 1855.
- 5) Special Report 61-G : The AASHO Road Test, Report 7, HRB, 1962.
- 6) Special Report 73 : The AASHO Road Test, HRB, 1962.
- 7) Bohn A., : Danish Experiments with the French Falling Weight Ball Deflectometer, 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.2, pp.647, 1967.
- 8) Bohn A., Ullidtz P., Strubstad R. and Sorensen A., : Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer, 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.1, pp.1119, 1972.
- 9) Claessen A. I. M., Valkering C. P. and Ditmarsch R., : Pavement Evaluation with the Falling Weight Deflectometer, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.45, pp.122, 1976.
- 10) De Jong D. L., Peutz M. G. F. and Korswagen A. R., : Computer Program BISAR : Layered Systems under Normal and Tangential Loads, External Report SMSR. 0006.73, Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam, 1973.
- 11) Monismith C. L., Epps J. A., Kasianchuk D. A. and McLean D. B., : Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure, Report TE70-5, University of California, Berkeley, pp.303. 1971.
- 12) Pell P. S., : Characterization of Fatigue Behavior, Special Report 140, HRB, 1973.

- 13) Proceedings of International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1982.
- 14) Proceedings of 2nd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Plymouth, England, 1986.
- 15) Proceedings of 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1990.
- 16) Proceedings of 4th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, 1977.
- 17) Proceedings of 5th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, The Delft University of Technology, 1982.
- 18) Proceedings of 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, 1988.
- 19) Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM Special Technical Publication 1026, 1989.
- 20) Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, ASTM D 4694-87.
- 21) Richter C. A. and Rauhut J. B., : SHRP Plans for Nondestructive Deflection Testing in the Development of Pavement Performance Prediction Models, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM Special Technical Publication 1026, pp.556, 1989.
- 22) Kasahara A. and Kikukawa S., : Pavement Data Base System and the Use of Deflection Data in Pavement Management System, Proceedings of the International Conference on Roads and Road Transport Problems, pp.80, University of Roorkee, India, 1988.
- 23) Monismith C. L., : Analytical Based Asphalt Pavement Design and Rehabilitation : Theory to Practice, 1962-1992, HRR 1954, 1992.

---

## 砂利道の歴青路面処理指針（59年版）増刷

第3刷 B5版・64ページ・実費頒価500円（送料実費）

	目 次	
1. 総 説	3. 路 盤	5. 維持修繕
1-1 はじめに	3-1 概 説	5-1 概 説
1-2 歴青路面処理の対象 となる道路の条件	3-2 在来砂利層の利用	5-2 維持修繕の手順
2. 構造設計	3-3 補強路盤の工法	5-3 巡 回
2-1 概 説	4. 表 層	5-4 維持修繕工法
2-2 調 査	4-1 概 説	付録1. 総合評価別標準設計例一覧
2-3 設計の方法	4-2 浸透式工法	付録2. 材料の規格
2-4 設計例	4-3 常温混合式工法	付録3. 施工法の一例(D-2工法)
2-5 排 水	4-4 加熱混合式工法	付録4. 材料の品質、出来形の確認

# FWDの使用の現状と今後の方向について

中村俊行\*

## 1. 土木研究所における使用の現状

土木研究所では、昭和63年にFWDを導入した。現在は、主として試験舗装の現地測定と構内実験場での測定に使用している。

### 1.1 試験舗装の現地測定

建設省では、米国のSHRP計画の一環として、全国で図-1に示す28箇所の試験舗装を実施し、調査を行っている(これを新基準調査という)。本調査においては、定期的に路面性状の調査を実施しているが、それとあわせてFWDによるたわみ量の測定も実施している。この測定は同一地点において毎年継続して行っているため、たわみ量の経時的変化を知ることができる。

### 1.2 構内実験場での測定

土木研究所構内には、油圧制御のアクチュエータで試験舗装に繰返し荷重をかける繰返し載荷装置(写真-1参照)があり、ここで繰返し載荷試験を実施している。この実験の目的は繰返し荷重の載荷に対する舗装の耐久性を評価することであり、最大5tのサイン波

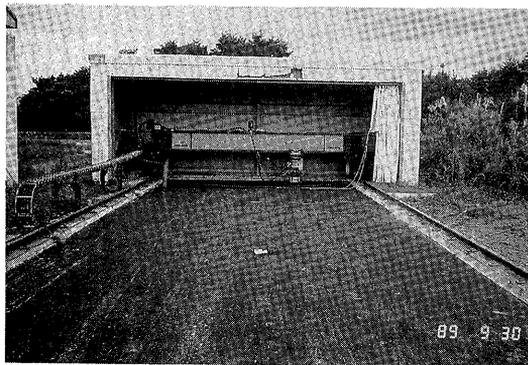


写真-1 繰返し載荷装置

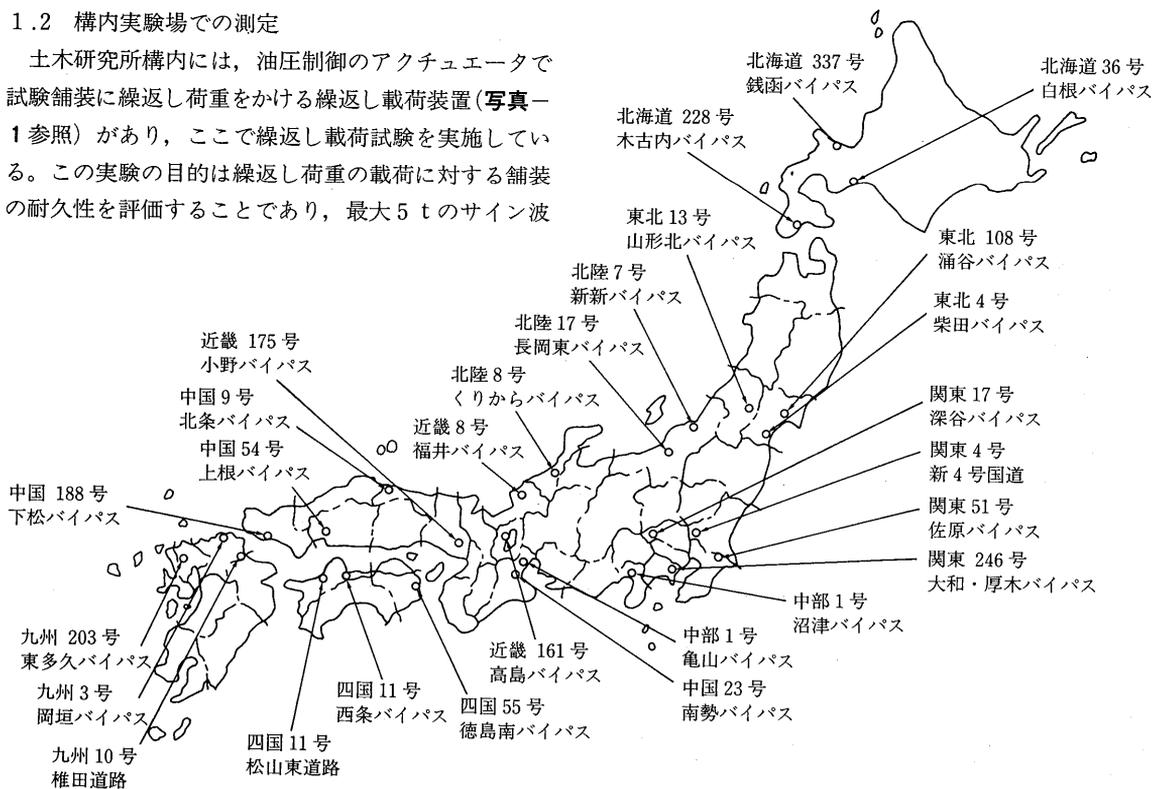


図-1 新基準調査試験舗装箇所

\* なかむら としゆき 建設省土木研究所舗装研究室長

荷重を100万回程度載荷している。当試験においては、一定の間隔をおいて載荷を中断し、FWDによるたわみ量の測定を行っている。

測定したたわみ量のデータは多層弾性理論による解析に使用しており、逆解析による各層の弾性係数の推定や、土圧の推定値と実測値との整合性の検討等を行っている。

## 2. 今後の方向

FWDで測定したたわみ量は舗装の支持力を反映しており、今後は既設舗装の構造的な健全度を示す指標として、道路の維持管理に用いられていくものと考えられる。ただし、たわみ量は路面性状とは異なり直接目に見えないものであるから、それを現場へ適用するためには、既存の舗装の評価手法との関連性を明らかにしていく必要がある。

### 2.1 舗装の評価指標への取り込み

現在、道路の維持管理における舗装の評価にあたっては、主としてMCI（維持管理指数）という指標が用いられている。

$$MCI=10-1.48C^{0.3}-0.29D^{0.7}-0.47\sigma^{0.8} \quad (\text{式-1})$$

C：ひびわれ率（%）

D：わだち掘れ深さの平均（mm）

$\sigma$ ：平坦性（mm）

MCIは、式-1に示すようにひびわれ、わだち掘れ、平坦性のデータから算出されるが、これらはいずれも路面性状の指標であり、構造的な指標は反映されていない。舗装の修繕にあたっては、単に表面的な破損状態だけでなく、舗装体内部の構造的な健全度も評価する必要がある。このため、FWDによるたわみ量を舗装の評価指標に取り入れることは非常に意義があるといえることができる。

現在、建設省で運用が試みられている舗装データバンクには路面性状データしか入っていないが、ここにFWDによるたわみ量のデータを取り込もうとする動きがある。また、将来的には、路面性状データとFWDによるたわみ量のデータを組み合わせて新しい評価指標を開発することも考えられる。

### 2.2 修繕設計法への応用

修繕の設計においては、表-1に示すとおり、既設

表-1  $T_{A0}$ の計算に用いる換算係数

層	既設舗装の構成材料	各層の状態	係数	摘要
表層・基層	加熱アスファルト混合物	破損の状態が軽度で中度の状態に進行するおそれのある場合	0.9	破損の状態が軽度に近い場合を最大値、重度に近い場合を最小値に考え、中間は破損の状況に応じて係数を定める。
		破損の状態が中度で重度の状態に進行するおそれのある場合	0.85~0.6	
		破損の状態が重度の場合	0.5	
上路盤	加熱瀝青安定処理		0.8~0.4	新設時と同等と認められるものを最大値にとり、破損の状況に応じて係数を定める。
	セメント・瀝青安定処理		0.65~0.35	
	セメント安定処理		0.55~0.3	
	石灰安定処理		0.45~0.25	
	水硬性粒度調整スラグ		0.55~0.3	
	粒度調整碎石		0.35~0.2	
下路盤	切込砂利および切込碎石		0.25~0.15	
	セメント安定処理および石灰安定処理		0.25~0.15	
セメントコンクリート版		破損の状態が軽度または中度の場合	0.9	
		破損の状態が重度の場合	0.85~0.5	

(注) 舗装破損の状態の判断

軽度：ほぼ完全な供用性能を有しており、当面の補修は不要であるもの。（おおむねひびわれ率が15%以下のもの）

中度：ほぼ完全な供用性能を有しているが、局部的・機能的な補修が必要なもの。（おおむねひびわれ率は15~35%のもの）

重度：オーバーレイあるいはそれ以上の大規模な補修が必要であるもの。（おおむねひびわれ率が35%以上）

舗装の残存価値( $T_{A0}$ )の評価を行う。しかし、それは多くの場合開削調査を伴うものであり、また、その評価基準は必ずしも明確ではなく、技術者の経験によるところが多いというのが現状である。そこで、FWDのたわみ量の解析による、非破壊で客観的な評価手法の確立が望まれる。

ここでは、たわみ量を多層弾性理論を用いて逆解析し、それによって得られた各層の弾性係数を表-1に示す残存価値の係数に対応させることが必要となる。しかし、施工直後の弾性係数を表-1の係数の最大値に対応させることはいいとしても、以後の弾性係数の

低下を残存価値の低下といかに対応させるかについては、たいへん難しい課題であるといえる。

この両者に対応させるためには、継続的にたわみ量と路面性状の測定を行い、両者の関係を明らかにしていく必要がある。また、修繕時には開削調査を実施し、弾性係数による評価と熟練技術者による評価との整合性を検討する必要がある。

— 参考文献 —

- 1) (財)日本道路協会：アスファルト舗装要綱（平成4年12月）

## 石油アスファルト統計月報

B5：16ページ ¥500（送料は実費）毎月1日発行

アスファルトに関する統計資料を網羅し、月毎に発行する統計月報です。

広くご利用いただけるよう編纂致しました。

ハガキにてお申込み下さい。

申込先 105 東京都港区虎ノ門2丁目6番7号  
和孝第10ビル  
社団法人日本アスファルト協会  
アスファルト統計月報係

— 目 次 —

- 石油アスファルト需給実績
- 石油アスファルト品種別月別生産量・輸入量
- 石油アスファルト品種別月別内需量・輸出量
- 石油アスファルト品種別月別在庫量
- 石油アスファルト品種別荷姿別月別販売量
- 石油アスファルト品種別針入度別月別販売量
- 石油アスファルト地域別月別販売量
- 石油アスファルト品種別通産局別月別販売量
- 石油関係諸元表

# 「第7回・アスファルト舗装に関する国際会議」 の論文抄録

“7th International Conference on Asphalt Pavements (2/2)”

今回の報告は、前回に引き続き、舗装に関する国際会議の中では最も権威の高いものの一つに数えられている「第7回・アスファルト舗装に関する国際会議」の論文抄録を取りあげた。前回の報告が本論文集の前半を、今回のものがその後半をカバーしていることになる。

さて、本研究グループの成果は、年に4度、本誌に発表の機会を与えて頂いており、大変に有難いことであると常日頃感謝をしている次第であるが、アスファルト舗装に強い関心をお持ちの方々ならばいざ知らず、毎号毎号連載型式で研究成果が掲載されると、多少食傷気味に思われる方もいらっしゃるであろうと案じている次第である。しかし、新聞や週刊誌に連載される小説などと違って、毎回読み切り型式でまとめさせて頂いているので、毎号が新企画であるという新たな気持ちで目を通して頂ければ幸甚です。

5年ほど前に新制の研究グループが発足したときには、舗装工学と称するものを新しい視点から体系化し、できればそのテキストに相当するような出版物を刊行

することを目標としていた。その間の、各ワーキンググループのリーダーを始めとする各メンバーの方々の努力には、真に目を見張るものがあったものと思う。不眠不休は大げさにしても、若さに伴う独特の頑張りに支えられて、自画自賛かも知れないがかなりの成果が蓄積されてきたように思う。しばしば連載小説に加筆修正の上単行本が出されるように、この会で蓄えてきた成果もそろそろまとめて世に問う時期が目前に迫ってきているものと期待している。

舗装あるいは舗装工学に関する教科書的な出版物は、その社会でのニーズに比べて著しく数が少ないと残念に思っているが、本グループを始め、土木学会や北海道土木技術会などで、様々な側面から斬り込んだ色々なスタイルのテキストが企画されているようである。舗装工学という狭い社会そのものの価値が問われ始めている昨今、産学官の間で何とかうまい協力関係を築いて全体の底上げを図りたいと痛感する。これを契機に、舗装の分野の益々の発展を祈念する次第である。

(姫野賢治)

## アスファルト舗装技術研究グループ名簿

\*は班長

姫野賢治	北海道大学工学部土木工学科	田中耕作	鹿島道路(株)技術部
阿部長門	東亜道路工業(株)技術研究所	田中輝栄	東京都建設局道路管理部保全課
飯田健一	鹿島道路(株)技術研究所	田中秀明	東亜道路工業(株)技術研究所
伊藤邦彦	大成ロテック(株)技術研究所	*谷口豊明	大林道路(株)技術研究所施工研究室
伊藤達也	日瀝化学工業(株)技術研究所	西川毅	熊谷道路(株)技術研究所
伊藤春彦	東亜道路工業(株)技術部	野村健一郎	大成ロテック(株)技術研究所開発研究室
梅野修一	運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室	野村敏明	日瀝化学工業(株)技術研究所
遠藤桂	日本道路(株)技術研究所	八谷好高	運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室
小笠幸雄	大林道路(株)企画室企画課	浜田幸二	日本道路(株)技術研究所
岡藤博国	世紀東急工業(株)技術部技術開発課	*藤田仁	日本道路(株)技術部
川西礼緒奈	日瀝化学工業(株)業務開発部	増山幸衛	世紀東急工業(株)技術部技術開発課
川端浩平	日本舗道(株)技術研究所	水口浩明	前田道路(株)技術研究所
佐々木巖	建設省土木研究所地質化学部化学研究室	*南沢輝雄	(株)バスコ道路技術センター情報技術部技術課
佐藤雅規	世紀東急工業(株)技術研究所	*峰岸順一	東京都土木技術研究所技術部舗装研究室
菅野伸一	常盤工業(株)技術研究所	村田信之	日本舗道(株)技術研究所
杉内正弘	飛鳥道路(株)技術研究所	森久保道生	昭和シェル石油(株)中央研究所
鈴木秀輔	大成ロテック(株)技術研究所開発研究室	山本達哉	大成ロテック(株)技術研究所
鈴木康豊	(株)バスコ道路技術センター情報技術部技術課	湯川ひとみ	鹿島道路(株)技術研究所
高橋修	長岡技術科学大学	横山稔	昭和シェル石油(株)アスファルト部
竹井利公	熊谷道路(株)技術研究所	*吉村啓之	前田道路(株)技術研究所第一研究室

(1) 著者名 (2) 原文題名 (3) ページ (4) 和文題名(抄訳者名) (5)論文概要

(1) Bonaquist, R. (USA)

(2) An Assessment of the Increased Damage Potential of Wide Based Single Tires

(3) pp.1~16

(4) ワイドベースシングルタイヤの増大する潜在的なダメージの評価

(吉村啓之)

(5) 本論文はヨーロッパ、カナダで広く使用されているワイドベースシングルタイヤのアスファルト舗装に対する応答および供用性に及ぼす影響を評価したものである。本試験ではバージニア州にあるFHWAの試験施工施設で、シングルタイヤとデュアルタイヤを装着した載荷装置を走行させたときの舗装体中のひずみの測定と供用性の調査を行った。埋設したひずみゲージを用いて測定したひずみはアスコン層下面の引張りひずみとアスコン層、路盤層、路床の圧縮ひずみである。舗装構造は路床、碎石路盤、アスコン層の3層構造で、アスコン層の厚さだけを変えている。走行試験は荷重、接地圧を変えて行い、季節ごとに測定して舗装温度の影響も調べている。シングルタイヤはデュアルタイヤよりも高いひずみを舗装体中に発生させ、全層圧縮によるわだち掘れが約1.1~1.5倍、アスコン層の疲労ダメージが3.5~4.3倍になると推定された。試験走路のわだち掘れ、クラック率の実測値から、シングルタイヤはデュアルタイヤに比べて、わだち掘れ量が約2倍となり、アスコン層の疲労寿命は約1/4になることがわかり、ひずみの測定値から供用性を想定することが可能であることが示された。本論文は限られた舗装構造での評価であるため、異なる舗装構造での評価が今後の課題となろう。

(1) Brunton, J. M., Armitage, R. J. and Brown, S. F. (英国)

(2) Seven Years Experience of Pavement Evaluation

(3) pp.17~30

(4) FWDおよびPADALプログラムによる7年間にわたる舗装評価について

(川西礼緒奈)

(5) FWDによるたわみ測定は、舗装の様々な状態による変動を求めめるために、また他の様々なデータから詳細な解析を行う上での基本として広く用いられているが、このFWD測定値を用いた解析プログラムにPADALがある。PADALは1985年以來、プログラム自体の応用や維持修繕の設計技術において多くの試みがなされてきた。本論文ではFWDおよびPADALプログラムについて、7年間にわたる数多くのケーススタディより、FWDたわみ量の実測値とこれによりPADALを用いて求められるスティフネス等の解析値との相関について検討したものである。

本研究により、FWD測定時での条件とPADAL解析時の設定条件との間に若干の補正が必要なものの、FWDたわみ量測定値とたわみ量よりPADALを用いて算出されるスティフネス、応力、張力等の解析値とに相関が得られこれらデータにより舗装の残存寿命を予測するための一助となると述べている。特に過度な挙動を示すジョイント部や軟弱路盤上のクラック部における測定および解析では舗装の状態を的確にとらえることができ、これによって従来の評価方法ではオーバーレイと判定される箇所でも、オーバーレイ以外のより経済的な補修によって舗装の機能を効果的に回復する方法を見いだすことができるとしている。

(1) Claros, G. and Hudson, W. R. (USA)

(2) Development of an Overlay Method for Flexisible Pavements on Lateritic Soils

(3) pp.31~53

(4) ラテライトにおけるたわみ性舗装のオーバーレイ設計手法

(田中輝栄)

(5) 本論文は、ナイジェリアにおける土壌および気候を考慮した力学的かつ経験的なオーバーレイ設計手法について述べられたものである。

本設計手法を論じるにあたっては、路面性状やたわみ量などによる既存舗装の評価、原位置での材料のサンプリングおよび試験、室内試験、残存寿命を決定するための既存舗装の解析、層構造の設計手法について検討がなされた。なお、検討にあたっては、ナイジェリアの8500kmの道路舗装が対象とされた。

本研究により、ナイジェリアを覆うラテライトにおける舗装の疲労方程式が開発された。本方程式が、ナイジェリアにおけるオーバーレイ設計手法の主要な部分である。本方程式の開発にあたって検討された方法論は、他の条件下における方程式を開発するためにも有効である。また、本疲労方程式は、アフリカ中部やアメリカ中部のよう

な土壌および気候がナイジェリアと類似した地域では、有効である。

ラテライトは紅土と呼ばれ、熱帯や亜熱帯地域に見られる高温・多雨の作用で鉄やアルミニウムなどの酸化物に富む紅色土壌であり、日本における舗装に対しては直接に参考とはならないと思われるが、海外での同様な地域における舗装工事の受注ということを考えると一読しておく文献であろう。

- (1) Beer, M. (南アフリカ共和国)
- (2) Developments in The Failure Criteria of The South African Mechanistic Design Procedure for Asphalt Pavements
- (3) pp.54~76
- (4) **南アフリカにおける「力学的アスファルト舗装構造設計」の破壊基準に関する検討** (野村健一郎)
- (5) 力学的アスファルト舗装構造設計法を活用するには、舗装の種類や使用材料に適した破壊基準や伝達関数が必要となる。本研究では、南アフリカ共和国において当該設計法を適用する際に必要な、破壊基準や伝達関数を検討している。

ここでは、破壊基準等に関する検討課題として、疲労に起因する破壊および圧縮に起因する破壊などを取り上げ、重交通シミュレータ (HVS) を用いたフルスケールの促進試験および室内試験などを実施している。検討にあたっては、ELSYM5と呼ばれる弾性プログラムを用いて、アスファルト混合物層の厚さと破壊に至までの載荷回数等を求めているほか、動的な舗装の挙動として①輪荷重の載荷位置と舗装に生じる最大たわみの発生位置のずれ、②輪荷重の移動に伴うアスファルト混合物層の弾性挙動の変化と永久変形の関係、③舗装温度とたわみの関係、④車両の走行速度と舗装のたわみの関係等を検討している。

現在は、これらの検討により求めた破壊基準や伝達関数を用い、力学的アスファルト舗装構造設計法を活用することで、より経済的な舗装を構築し、道路に係わる予算を大幅に削減している。

本研究に関連する論文が、第5回、第6回の「アスファルト舗装の構造設計に関する国際会議」でも報告されているので、興味のある方は参照されたい。

- (1) Boissoudy, A., Gramsammer, J. C. and Kerzreho, J. P. (フランス)
- (2) The Circular Test Track Facility and Road Maintenance Studies on Flexible Pavements.
- (3) pp.77~95
- (4) **たわみ性舗装における円形走行試験トラックと道路メンテナンスに関する研究** (野村敏明)
- (5) この論文は、Nantes円形走行試験トラックを用いて、新設アスファルト舗装とオーバーレイ舗装の挙動を測定・比較し、表層クラックとわだち掘れに対処するための舗装構造について検討したものである。

Nantes円形走行試験トラック (半径17.5m, 巾6m) は荷重調整が可能で、しかも20cmのレベル差があっても走行できるため、オーバーレイによるかさ上げ舗装断面も同時に試験することができる。この設備を用いて、60種類におよぶ舗装構造について、3000万回以上の走行試験を行い舗装破損に関するデータを収集した。

走行試験から次のような成果を得た。①クラック発生に関しては、オーバーレイの厚さが8cmの場合と4+4cmの場合では大きな違いがなく、またオーバーレイ層のクラックの発生は既設舗装の弾性係数が1000Mpaと低い場合に生じやすい。②わだち掘れ深さの予測モデル式を作成した。オーバーレイ後のわだち掘れは、下層既設アスコンのわだち掘れの継続度合いに大きく影響される。

実規模に近い大型の走行試験で構造上のパフォーマンス評価を行うことは、舗装設計の最終チェックであり、材料開発および構造設計に大きく貢献する。日本においても、このような試験データが数多く報告されることを希望したい。

- (1) Duskov, M. and Bull-Wasser, R. (オランダ, ドイツ)
- (2) Analysis of Asphalt Test Pavements with a Sub-Base of Expanded Polystyrene Foam
- (3) pp.96~109
- (4) **発泡スチロール成形材を下層路盤に用いたアスファルト試験舗装の解析** (阿部長門)
- (5) 発泡スチロール成形材を下層路盤に用いた6種類のフルスケールの試験舗装を構築し、その挙動を調査するとともに、有限要素プログラムを用いて数値解析を行った。試験舗装の測定には、アスファルト層下面の引張りひずみ、表面たわみ、路盤層の締め固め度、長期載荷試験によるわだち掘れ深さの各項目が含まれている。数値解析は、非線

形材料モデルを用いたDIANAプログラムを用いた。発泡スチロールに発生する応力とひずみを算定し、使用材料および舗装厚さについて検討を行った。

本論文では、一軸圧縮試験によるEPSの変形係数と土槽に試験舗装を構築し交通荷重に類似したパルス波を載荷し、路盤材の密度とその変動および変形係数について調べている。また、FWDを測定し弾性係数の逆解析を行っている。フルスケールの試験舗装は、ノルウェー、ドイツ、オランダの3タイプの舗装構成にアスファルト混合物層の厚さを2種類設定し、6種類の舗装構成とした。

長期載荷試験結果では、100万回載荷後のわだち掘れ深さが10mm未満の舗装タイプは、コンクリート版を用いたノルウェータイプとセメント安定処理砂を用いたドイツタイプであった。このようなサンドイッチ構造を適用した舗装では密度と碎石の弾性係数の間に相関があるが、EPS上に碎石を舗装した舗装ではEPSの支持力に依存しており、碎石層の密度に関係なく碎石層の弾性係数が小さい。5tf荷重の載荷で、サンドイッチ構造でない舗装はEPSに発生する垂直圧縮ひずみがサンドイッチ構造の2～3倍の値が生じており、この結果が累積変形量に表れている。輪荷重が小さい場合は、粒状路盤をEPS層の上に用いた舗装構成で十分であるが、5tf輪荷重レベルでは、EPS層の上にセメント安定処理またはコンクリート版を用いたサンドイッチ構造を適用することを推奨している。

本論文では、土槽内にフルスケールのEPSを用いた試験舗装を構築し長期載荷試験を行っている。わが国においては盛土の沈下特性の例はあるが、EPSが破壊しないようにその上の舗装構造を検討した例は少なく、今後の参考となるだろう。

(1) Fernando, E. G. and Lytton, R. L. (USA)

(2) A System for Evaluating the Impact of Truck Characteristics and Use on Flexible Pavement Performance and Life-Cycle Costs

(3) pp.110～131

(4) **トラック特性の影響評価システムとアスファルト舗装の供用性評価とライフサイクル分析への利用** (南沢輝雄)

(5) 1987年に、フロリダ州交通局とテキサス交通研究所は、トラック特性(サスペンション、タイヤ空気圧、軸荷重、軸形状)の舗装に対する影響を評価するシステムの開発とアスファルト舗装の供用性評価とライフサイクル分析への利用に関する研究を始めた。本論文では、この研究で開発したプロジェクトレベルにおける舗装マネジメントシステムである包括的舗装解析システム(フロリダCOMPAS)の概要について紹介している。

本システムは、①荷重変化アルゴリズム、②車両シミュレーションモデル、③等価荷重評価プログラム、④標準荷重換算プログラム、⑤供用性評価とオーバーレイ設計プログラム、⑥費用評価プログラムの6つの解析モデルから構成されている。

供用性の評価は、舗装損傷方程式と舗装解析プログラム(FLEXPASS)を用いて行なわれ、疲労ひびわれ、わだち掘れ、サービス性能の低下等の要因によりオーバーレイの時期を決定している。費用評価は、費用解析プログラム(FLAGCAP)を用いて行なわれ、PSIに対応したユーザーコスト(車両減価償却費、オイル消費、タイヤ損耗費、旅行時間費用)を設定している。

本論文では、ケーススタディーとして、車種毎の車両走行費用を算定しているので参考となる。

(1) Goacolou, H., Dimitri, A., Prudhomme, F. and George, L. A. (フランス)

(2) Use of Subnormal Local Aggregates in High Modulus Asphalt Mixes

(3) pp.132～147

(4) **ハイモジュラスアスファルト混合物での規格外地方骨材の使用** (鈴木康豊)

(5) フランスでの高速道路建設に際して、建設される地方で採取される骨材は、著しく不良な骨材である。そのため、この不良な骨材にハイモジュラスミックス(HMM)を用いて高速道路の建設を進めながら、現場試験、室内試験を行い、HMMの有効性について述べたものである。

この地方に、高速道路を建設するため、その周辺の環境及び採取される骨材を調査した。そして、骨材においては、ほとんどが不良なためHMMを使用し、設計から施工までの間、現場及び実験室で試験を行った。また、力学的特性も調査した。

この地方の骨材は、仕様書の規格に当てはまるものが、まれであるため規格外骨材を使用するために、HMMの採用を提案した。HMMを使用した混合路盤の舗装は、標準の舗装より同じかそれ以上の特質があると認められ、計算上や現場の実測でも力学的に良好な結果を得た。

本論文は、実際的高速道路の建設について述べられたものであり、HMMを使用した今後の効果について継続的に調査される事を期待したい。

(1) Hardy, M. S. A. and Cebon, D. (英国)

(2) The Effects of Dynamic Axle Loads on the Response and Life of Flexible Pavements

(3) pp.148~162

(4) **たわみ性舗装の応答と寿命に対する動的軸荷重の影響**

(岡藤博国)

(5) たわみ性舗装に動的荷重を加えた時の影響を調べるためには荷重の伝播について理解することが重要である。本論文は、試験道路において静的荷重、動的荷重に対するたわみ性舗装の応答およびその予測について研究し、動的荷重が道路に与えるダメージについて評価しようとしたものである。

動的荷重が道路に与えるダメージを予測するために、応答の直線性、等方性、温度依存等について検討し、試験道路で車両を走行させ、その応答と車両モデルによる予測との比較を行っている。

試験道路において、応答の直線性、等方性は、応答を予測する上で十分満足できるものであったが、温度については敏感であった。予測による応答は、試験道路で測定した応答とよく一致した。

FWDによる舗装の構造解析がさかんにおこなわれているが、本研究は走行車両の応答について研究しており、構造解析する上で参考になるとと思われる。

(1) Hiltunen, D. R., James, J. R. and Roque, R. (USA)

(2) Prediction of Airfield Pavement Response Employing Nondestructive Testing Procedures and Elastic Layered Theory

(3) pp.163~178

(4) **空港舗装におけるFWDを用いた実荷重下のたわみ予測**

(峰岸順一)

(5) 本調査は、アメリカにおいて1988年にFAA (Federal Aviation Administration) が出資して行ったプロジェクトである。調査目的は、空港舗装における、非破壊試験 (FWD) によるたわみ測定を理論的に検討し、実際の航空機の荷重下での舗装のたわみを予測することであった。

調査において、7 空港で航空機の荷重および速度を変えて舗装のたわみデータの収集が行われた。たわみ測定は、舗装の表面と表面から1.83mの深さに速度変換ゲージを設置して行われた。また、非破壊試験としてFWDによるたわみ測定を速度変換ゲージによるたわみ測定と同時にを行い、弾性層解析により逆計算し弾性係数を求め、実際の航空機の荷重下でのたわみを予測した。この予測たわみと実際の航空機の荷重下で測定されたたわみとの比較を行った。

その結果、解析されたすべての場合において、輪荷重直下での予測たわみと実測たわみとはよく一致したが、荷重からの距離および深さが増加すると予測がしだいに悪くなった。これは、路床材料が非線形であることに起因するとしている。

ここで紹介された空港舗装における、非破壊試験 (FWD) によるたわみ測定から実荷重下のたわみを予測する手法は、道路舗装においても十分参考になると考えられる。

(1) Hoyinck, W. T., van der Loo, J. M. M., Mulderij, J. and Kuijper, R. (オランダ)

(2) Comparative Tests of FWD and Lacroix-Deflectograph

(3) pp.179~193

(4) **FWDとラクローアデフレクトグラフの比較試験**

(田中秀明)

(5) 近年、舗装の維持管理システムの手法として、FWD等の装置を用いて舗装のたわみ形状を求め、理論解析を用いて構造的な面から舗装評価が行われている。本論文はこれらの装置のうち、単荷重で行われるFWDと6輪荷重で行われるラクローアデフレクトグラフの比較試験を行うとともに、FWDからラクローアデフレクトグラフへあるいはラクローアデフレクトグラフからFWDへパラメータを換算する手法を確立している。また、路床変動等に伴う舗装破壊が問題となっており、そのためのデータ収集も本研究の目的の一つである。

両装置を用いての比較試験は、温度、地下水位が同条件下である舗装断面上で同位置において並行して行われ、そのたわみ形状は幾何学パラメータと構造パラメータに分別でき、これらの各パラメータについての相関と必ずみレベルにおける相関関係が導かれている。

本研究の結果、たわみ形状において、FWDとラクローアデフレクトグラフ間に両パラメータにかなりの相関関係

が示され、ひずみレベルの相関に関してもある規則的な軌道を示すことが確認されている。

本論文は測定方法が異なる2種類の装置を用いて、パラメータ換算法の確立を前提にたわみおよびひずみレベルから研究を行い、かなりの成果が得られた論文であり、今後の進展が楽しみである。

(1) Huhtala, M. and Pihlajamaki, J. (フィンランド)

(2) New Concepts on Load Equivalency Measurements

(3) pp.194~207

(4) 等価荷重測定の新しい考え方

(湯川ひとみ)

(5) AASHO道路試験において軸荷重の等価換算式は3.4~4.6乗いわゆる4乗則が引き出され、広く用いられている。しかしAASHO道路試験が唯一の気象、路床条件で行われた促進試験であり、試験から既に30年が経過し、自動車は大きく変化したにも関わらず、この4乗則が利用される背景には、式の簡易性とこのような実物大試験を実施するためには莫大な費用がかかる等の理由がある。近年、荷重の等価換算は上記の値以上に変化することが示され、本論文もこれを検証した。

試験は実物大のOECD/FORCE円形トラック試験で、荷重(100, 115kN)が舗装のパフォーマンスに与える影響を比較し、Burgerモデルに基づくコンピュータシミュレーションでも検討を行った。

荷重の通過回数とクラック、舗装体内のひずみの測定結果から異なった軸荷重の影響は1.80~6.68乗であることが分かった。またタイヤの種類が舗装に及ぼす影響は、ワイドベースタイヤが複輪タイヤの2.3~4.0倍程大きいことが分かった。

本論文は軸荷重とタイヤの種類による舗装のパフォーマンスを示したものであり、大変参考になる文献である。

(1) G. J. Jordaan. (南アフリカ)

(2) Towards Improved Procedures for The Mechanistic Analysis of Cement Treated Layers in Pavements.

(3) pp.209~223

(4) セメント安定処理路盤(CTB)の解析方法の向上にむけて

(佐藤雅規)

(5) セメント安定処理路盤(CTB)層の水平引張りひずみには、層の性質に基づいた評価方法が行われている。しかしながら、これは層の性質として層の下面に最大引張りひずみが発生するという仮定に基づいているため、実際の現場での舗装破壊と大きく異なる結果となっている。

そこで本研究では、HVS(Heavy Vehicle Simulator)という加速度による荷重装置を用いて、CTB層(セメント量4~5%)の挙動を測定し、舗装のひずみ特性と寿命について検討を行っている。

この結果、実際の現場でのCTB層の特性は、交通荷重の累積回数とともに、有効弾性係数が減少していくことが解った。これは、交通荷重によりCTB層下面にクラックが発生して、最大ひずみの発生する位置が徐々に下面から上に移っていくためである。この結果に基づき、一般に使用されている有効弾性係数3000MPaよりも500~600MPa小さい値の使用を奨励している。

本研究は、HVSという試験機を用いて実際の現場での測定を行い、解析をしている。わが国において、これからコンクリート舗装等でCTBを使用する頻度が高くなってきているため、このCTBの特性を知る上で参考となる文献であろう。

(1) Lepert, Ph., Poilane, J. P. and Bats-Villard, M. (フランス)

(2) Evaluation of Various Field Measurement Techniques for the Assessment of Pavement Interface Condition

(3) pp.224~237

(4) 舗装の層間問題の把握と評価および測定技術について

(遠藤 桂)

(5) 舗装の各層間の結合力の欠如は、舗装に重大な被害をおよぼす。この点を診断するためのNDT装置が種々あるが、最も効果的な方法を開発することが目的である。

この問題を把握し、評価するために層間条件の異なる試験舗装区間でいろいろなNDT装置の能力を比較してみた。

その結果、未だプロトタイプの段階ではあるが、ある衝撃試験が最もよく評価できることが判った。それを用いた方法をCOLIBRIシステムと名付けた。

- (1) Myre, J. (ノルウェー)
- (2) Fatigue of Asphalt Materials for Norwegian Conditions
- (3) pp.238~251
- (4) **アスファルト舗装の疲労についてのノルウェーでの研究結果** (鈴木秀輔)
- (5) アスファルト舗装の疲労によるひび割れは、振動に起因する破壊で、舗装全層にまでダメージを与える。本報は、疲労試験の結果をとりまとめたものである。
- 疲労試験には、4点繰返し曲げ装置(FPB)、ゴムベース上での中央荷重梁(CPB)、間接引張り試験装置(ITT)の3種類の異なった種類の装置を用い、表層材7種、基層材1種、路盤材3種の計12種類のアスファルト混合物について試験している。以下に試験結果の一部を示す。
1. 疲労寿命設計ではモードファクター(MF)を考慮することが重要である。
  2. 道路の縦断方向と横断方向の疲労特性は概ね同一である。
  3. カリフォルニアニーディングコンパクターを用い締固めた供試体と現場でローラにより締固めた供試体の疲労曲線はほぼ同一である。
  4. 補強材(グリッド)の使用では、クラック発生までの荷重回数の延長効果は認められないが、クラックが発生後に補強効果があらわれる。
  5. FRPとCPBでは概ね同一の疲労曲線が得られるが、ITTでは両者に比べ急勾配の疲労曲線を示す。また、曲げ試験により得られた疲労曲線はおおよそ信頼できるということが判った。
  6. ひずみ、E係数、バインダー量、空隙率そしてMFにより破壊までの荷重回数の変化を説明できることが判った。
- 疲労を解析する上で、試験装置の比較を行った当報告は参考となると思われる。

- (1) Nazarian, S., Baker, M. and Boyd, R. C. (USA)
- (2) Determination of Pavement Aging by High-Frequency Body and Surface Waves
- (3) pp.252~265
- (4) **高周波による舗装の評価法** (小笠幸雄)
- (5) 本論文は、高周波によって、アスコン層の経年的な老化度を評価する方法論およびそのケーススタディについて論じられている。
- 評価法としては、高周波の伝達がアスコン層の弾性係数とポアソン比に関係することに注目し、アスコン層を通過して、受信される信号をスペクトラル解析(SASW)することにより、舗装の評価指数としての弾性係数とポアソン比を算出している。
- ケーススタディでは、弾性係数と温度の関係も適切に決定されること、またこの評価に費やす時間が、切取供試体を利用する手法やその他の現場試験法と比較して、迅速で経済的であることが紹介され、高周波伝播技術がアスコン層の老化特性に価値ある情報を与えることを示唆している。
- 既設舗装の材料および構造評価のために、各種の室内試験(間接引張り試験・クリープ試験等)や現場試験(FWDによる舗装構造評価等)が試みられているが、それに費やされる時間や労力はまだ多大である。本研究は、SHRPの一部として実施されたものであるが、効率的で経済的な舗装評価法の開発として今後の成果に注目したい。

- (1) Nunn, M. E. and Bowskill, G. (英国)
- (2) Towards a Performance Specification for Bituminous Roadbase
- (3) pp.266~279
- (4) **瀝青安定処理路盤の供用性に基づく仕様に向けての研究** (田中秀明)
- (5) 瀝青材料を用いた舗装の供用性に関する研究は、米国のSHRP計画のもとで行われており、また、現在の英国の設計法では、瀝青材料の構造特性を舗装の供用性に関連させることができる。しかし、適切な試験方法がないことから、瀝青材料の構造特性を用いた仕様は未だできていない。本論文は瀝青安定処理路盤における供用性について、荷重分布特性と弾性スティフネスに着目し、その研究成果を述べている。
- 瀝青安定処理路盤のスティフネスを評価する方法として、筆者らは間接引張り試験が適切であることを見だし、その方法と曲げ試験により評価を行っている。また、間接引張り試験に関しては室内作製供試体の他に現場コアによる試験も行っている。

瀝青安定処理路盤の供試体に関する特性は、道路舗装に要求される目的に応じて設計するためにも必要不可欠なことであり、本研究により間接引張り試験はスティフネスに関する適切な供用性試験であることが確認され、変形、ひび割れおよび長期耐久性における研究が現在継続されている。

今後、瀝青安定処理路盤を使用した舗装の供用性を把握することにより、合理的でより経済的な設計手法の確立につながるものと考えられる。

(1) Rohde, G. T. Smith, R. E. and Scullion, T. (南アフリカ)

(2) Pavement Deflection Analysis on Sections Where the Subgrade Vary in Stiffness with Depth

(3) pp.280~295

(4) 路床のスティフネスが深さによって変化する場合のたわみ解析

(高橋 修)

(5) 一般に、表面たわみによる舗装の構造評価では路床を等質の半無限地盤と仮定しているが、実際は深さによってスティフネスが変化している。本論文では、路床におけるスティフネスの変化を適当な深さにベッドロックを挿入することで対応できることを示し、表面のたわみより見掛け上のベッドロックの位置を求める手法について述べている。目的としては、逆解析にベッドロックを挿入したモデルを用いることにより逆解析の精度を向上させることにある。

見掛け上のベッドロックの深さを求める手法は、シミュレーションの結果から表面たわみがゼロとなる位置がベッドロックの深さと強い関係があると仮定し、たわみがゼロとなる位置(たわみ曲線から外挿して決める)とたわみの指数( $SCI=D_0-D_{30}$ など)を用いた回帰分析によってベッドロックの深さを求めている。そして、路床を多くの層に分割してスティフネスの変化したモデルのたわみ形状とベッドロックを挿入したモデルのたわみ形状を比較して、路床におけるスティフネスの変化をベッドロックの挿入で代用できることを示している。論文の最後にFWDによる実測データを用いて、本研究で検討したベッドロックの位置を求める手法の妥当性と逆解析の精度が向上することを確かめている。

本研究は逆解析において問題となっているベッドロックの有用性とその位置について詳細に合理的に検討しており、FWD等による構造評価の分野においては非常に参考となる研究である。

(1) Roque, R., Romero, P. and Hiltunen, D. R. (USA)

(2) The Use of Linear Elastic Analysis to Predict the Nonlinear Response of Pavements

(3) pp.296~310

(4) 舗装の非線形挙動を推定するための線形弾性解析の適用

(谷口豊明)

(5) 有限要素法を用いた舗装の要素を解析は、荷重に対する非線形挙動、特に路盤や路床など、を抱える手法として用いられるが、解析方法が複雑で計算に時間がかかり、またより洗練された試験装置による測定データをインプットする必要がある。そこで、多層弾性理論による解析手法において、インプットの方法すなわちE値の与え方に検討を加えて、多層弾性理論による解析手法で有限要素法とほぼ類似する計算値を得られないかを検討したものである。

本研究に用いた解析プログラムはILLIPAVE(FEM)とBISARである。16種の断面でたわみ、応力、ひずみを計算し、次にILLIPAVEで得られる表面たわみと同じたわみが得られるE値をBISARで逆計算する。このE値を有効弾性係数と称し、このE値をBISARに用い、応力、ひずみの計算値をILLIPAVEのものと比較検討した。

検討した16の断面に関しては、①有効弾性係数を用いれば舗装の非線形挙動を十分な精度で推定できる。②碎石路盤層の非線形挙動はこの層を一層の弾性体としても十分推定できる。③路床は上部30cmの層とそれ以下の層に分けて各々に有効弾性係数を与えれば非線形性の評価は十分であるが、路床土(例えばシルト質砂)によってはこの解析手法が適用できないものもあるなどの知見が得られた。

路床、路盤の非線形性を評価する手法として注目される文献である。

(1) Rust, F.C., Robler, J. E., Myburgh, P. A. and Hugo, F. (南アフリカ)

(2) Towards Analytical Mix Design for Large-stone Asphalt Mixes

(3) pp.311~325

(4) 大粒径アスコンの分析的配合設計法について

(水口浩明)

(5) 南アフリカでは、近年交通量と軸重が増大し、結果として現行の設計をはるかにしのぐ交通荷重になっている。

加えて法規制も緩和された。そこでHeavy Duty Asphalt Pavement (HDAP) を検討する事になった。このプロジェクトは、最大粒径が37.5mmと53mmの大粒径アスコンに焦点をさだめて実施された。本文では大粒径アスコンの分析的配合設計法の開発とその応用による13の試験舗装、加えてその機械的性状と舗設のしやすさについてのべている。

大粒径アスコンの利得は支持力の増加と経済性の2点である。配合設計法は、直径150mmのモールドを用いたマーシャル法と、修正マーシャル法であるHugo法を用いて検討している。室内試験では、レジリエントモジュラス、引張り強度、最大ひずみ時の強度および静的・動的クリープ係数を取り扱っている。現場試験では、最大粒径が37.5mmと53mmの10種類の混合物を用いた各20mの試験舗装区間を設けて検討している。さらに検討された配合設計法を確認するために、最大粒径37mmのセミギャップ・セミオープン・連続の3粒度で現場加速度試験を実施してスティフネスや動的クリープ試験を通して評価している。

大粒径アスコンの配合設計法については目標粒度の算出、設計基準値の提案がなされている。粒度については連続粒度は施工しやすいが開粒度に近くなると分離し易くなり、また最大粒径が大きい方が分離し易く舗設しにくくなるとしている。ここで提案された配合設計法は現場での試験結果も良好で、大粒径骨材の利用を可能にし、実際に用いられていると伝えている。

大粒径アスコンはわが国では特殊な場合を除いて用いられていないので実感がわかなかった。施工機械にも興味がある。

(1) Shaat, A. A., Kamal, M. A. and Matter, N. S. (英国)

(2) Relationships Between Climatic Conditions and the Structural Parameters of Flexible Pavements

(3) pp.326~340

(4) **アスファルト舗装の構造特性と気象条件との関係**

(南沢輝雄)

(5) 北アイルランドにおいて、1990年よりデフレクトグラフのたわみ試験による広範な研究が行なわれている。本論文では、季節変化に伴う温度、湿度の舗装の弾性係数への影響について述べたものである。

クウィーンズ大学における高速道路研究プログラムの主目的は、設計、評価に関する構造解析手法と北アイルランドの道路ネットワークのマネジメント手法の開発、改良、適用である。北アイルランドでは、1977年にデフレクトグラフを導入し、15ヶ年にわたって幹線道路のたわみ調査を行なっている。クウィーンズ大学と北アイルランド環境省の道路研究グループは、デフレクトグラフで測定したたわみを逆解析することにより、舗装構成層の強度、弾性係数を求めている。解析では、たわみプロファイルを決める有限要素プログラム(DEFPAV)、舗装寿命評価プログラム(EPLD)を用いている。

本研究の成果として、①路床温度の季節変動は、舗装構造を設計、評価する上で重用な要素である、②粒状碎石材料の弾性係数の季節変動は、路床上の変動に比べ小さいため、特殊な場合を除いて無視できる、③アスファルト層4cmの深さで測定した平均舗装温度は不正確であり、平均舗装温度は測定日とその前3日間の平均気温から予知できる、が判明した。

本研究は、北アイルランドでの1年間だけで得られたデータの成果であるため、異なる環境ではそのまま適用することはできないと思われる。

(1) Strauss, P. J., Kleyn, E. and Plessis, J. A du (南アフリカ)

(2) Field Performance, Laboratory Testing and Predictive Models for Modified Binders Used in Reflection Cracking

(3) pp.341~355

(4) **耐リフレクションクラックに関する改質バインダーの評価**

(森久保道生)

(5) オーバーレイの設計と建設はリフレクションクラックの抑制を目的のひとつとして行われる。しかし、改質バインダーの大幅な改良は進んでいるが、リフレクションクラックに対する認識や設計方法は広く浸透していない。本論文はクラックの挙動のモデル化や供用性能予測に関する重要な要因や実際の供用区間の調査により得られた経験について検討した。

リフレクションクラックの要因として、載荷による曲げ、垂直方向の移動、及び水平方向の移動の3種類と仮定し、ノモグラフを用いてリフレクションクラックをモデル化した。また、数種類のバインダーを用いて温度や載荷速度とスチフネスの関係を求めた。さらにオーバーレイした供用中の道路のクラックや、載荷実験とせん断応力の

関係を調査し、バインダーとリフレクションクラックの相関を調べた。

本研究の結果、リフレクションクラックのメカニズムは複雑であるため、一定の条件下でのみノモグラフを用いてモデル化する事ができることが確認された。また、リフレクションクラックに影響を及ぼす要因としてバインダーのスチフネス、外気温、道路構造などが考えられ、その中で、改質アスファルトの使用はリフレクションクラックの抑制に効果がある事が確認された。

日本においても舗装ストックが増加し補修時代に入っている現在、リフレクションクラックの対策がさらに必要になってくると思われる。

- (1) Van der Merwe, C. J., Theyse, H. L., Horak, E., Hugo, F. and Du Plessis, J. A. (南アフリカ)
- (2) Evaluation of the rehabilitation design of a BTB Pavement and the Effect of Artificial Ageing using accelerated Wheel Load testing
- (3) pp.356~379

- (4) **南アにおける補修時の各種設計法の加速載荷試験機を用いた評価** (川端浩平)
- (5) HVS (Heavy Vehicle Simulator) を用い、南アにおけるアス安定処理による補修設計法の評価を行った報文。特にAgeing (老化) との評価を重ねて行い、HVSの室内モデルとして1/10サイズのMLS (Mobile Load Simulator) も使用している。対象としている設計法は、南ア法、AI法、TRRL法、Shell法、およびDCP (Dynamic Cone Penetrometer) 法である。

HVSを用いた実走路における測定と各種の設計法を比較すると、それぞれ各種の設計法を測定結果に対応させるためのシフトファクターが必要とされる。しかし、路面を加熱することにより、舗装の老化を促進した場合、各種の設計法のシフトファクターは小さくなり、老化を受けた舗装体の応答は、もとの舗装体の応答と近くなっていく。

さらに、MLSを用いた室内試験では、老化により疲労に対する抵抗性は小さくなるが、わだちに対する抵抗性は大きくなることを確認している。また、MLSによる試験は各種の試験条件を設定できるので、大規模な試験を行う前の試験として、十分利用価値があるとしている。

設計法の評価等においては、シフトファクターの導入など、興味深いものがみられる。また、HVSやMLSなどは、日本では余り見られないものであり、パフォーマンスの測定などに積極的に利用できるものではないかと考えられる。

- (1) Gulp, C., Hoyinck, W., Streek, A. and Thewessen, B. (オランダ)
- (2) Harmonisation of Falling Weight Deflection Evaluation Procedures
- (3) pp.380~394
- (4) **FWDたわみの評価法** (梅野修一)
- (5) オランダではアスファルト舗装の研究、構造評価、維持、補修などを行うためにFWDたわみのデータを利用している。しかしFWDにも様々な種類があり、その種類によって荷重やたわみの波形が異なってくる。しかし現在ではFWDたわみのピーク値のみを用いて評価している。そこでこの論文ではFWDのロードセルとセンサーのキャリブレーションを行なう際に違うタイプのFWDでも比較検討が行うことができるように荷重の波形も含むべきであると提案している。

- (1) Vinson, T. S., Jackson, N. M. and Jung, D. H. (USA)
- (2) Thermal Cracking Resistance of Asphalt Concrete : An Experimental Approach
- (3) pp.395~408
- (4) **サーマルクラックへの抵抗性を有するアスファルト混合物に関する実験の手引き** (水口浩明)
- (5) アスコンの低温クラックやサーマル疲労クラックは世界中のどの地域でも重大な問題であり、SHRP計画でも温度応力抑止供試体試験 (TSRST) は現在まで検討されてきた。5 × 5 × 25cmの供試体を10℃/hrで冷却したTSRSTでは低温クラック抵抗性について重要な知見が得られ、繰り返し低温冷却下のTSRSTではサーマル疲労クラック抵抗性についての知見がえられている。本文中の研究課題はSHRP計画A-003Aの一端で、初期目標はアスファルトのバインダ性状と舗装の供用性の関連を確認することであり、第2段階の目標は通常的配合設計書とあわせた加速度混合物供用性試験法の開発であった。SHRP計画A-003Aのサブ課題である本研究では、アスコンの低温およびサーマル疲労クラック抵抗性についての適切な室内試験法や予測試験法を検討している。

筆者らは多数の文献を調査し、低温クラックの評価試験についてはTSRSTを推奨し試験方法を述べている。また、サーマル疲労クラックの評価には、推奨できる方法は提案していないが、ひずみエネルギーの取り扱いについては言及している。本文中の実験内容はTSRSTに僅かな変更を加えたもので、空隙率及び冷却速度と割裂温度との関係を検討したものと、空隙率と割裂温度との関係に養生時間を加味したものである。サーマル疲労破壊に関する実験はさわりの部分だけの紹介にとどめている。

TSRSTはアスコン低温クラック抵抗性の評価に有用であるとしており、サーマル疲労クラック抵抗性については予備的な結果として直接・間接引張り試験を通したアスコン中のエネルギー吸収量（破壊にいたるひずみエネルギー量）の関与を示唆するに留めている。

温度応力抑止供試体試験（TSRST）の有用性は簡単にまとめられているが多数の参考文献を検討しないと筆者らの主張を読み取りきれないと感じた。

- (1) Wolff, H., Kleyn, E. G., Visser, A. T., Beer, M. (南アフリカ)
- (2) The Elasto-Plastic Behaviour of Crushed Stone Bases in Flexible Pavement Structures under Accelerated Testing
- (3) pp.410~427
- (4) **促進試験に基づくたわみ性舗装の砕石路盤の弾塑性特性** (阿部長門)

- (5) 主要なS-N曲線に基づいたモデルを用いて重車面シミュレート試験（HVS）による砕石層のわだち掘れ予測を開発した。このモデルは、マイナー則を用いた舗装の解析により寿命を評価している。砕石路盤の現場密度を84%となるように締固めた舗装において、わだち掘れが減少することによる便益を開発したモデルで説明している。舗装の設計と維持修繕の主要な目的は、舗装体に水が侵入することを防止することであり、このモデルでは砕石層の平衡含水比のみで開発を行っている。

本研究では、砕石路盤の動的三軸圧縮試験を行い、ヒステリシスループより弾塑性材料と定義している。また、HVS載荷試験の前に表面たわみとマルチデプスデフレクトメーター（MDD）の測定を実施し、たわみ測定値とK1, K2の結果よりMICHPAVEプログラム（非線形、応力増分法）で弾性係数の推定を行っている。この結果を用いて累積残留ひずみ $\epsilon_p$ と繰返し回数Nの関係を求め、HVS載荷試験結果との比較を行っている。両者の結果より、HVSの荷重40kNと100kNのS-N曲線を求め、双曲線関数を用いた回帰式を提案し、層厚150mmで永久変形1.5mm（1%）を破壊としている。

本研究では、3段階の交通荷重レベルにより3種類の主応力 $\theta$ と載荷回数Nの関係を求め、マイナー則を用いて1未満となるように舗装厚を決める設計法を提案している。この設計法で求めた舗装厚は、実交通でのわだち掘れと高い相関が見られた。

本研究は、たわみ測定値と非線形解析（MICHPAVE）を組み合わせた解析から、HVS載荷試験の結果を取り入れわだち掘れ推定式を提案しているが、わが国においても三軸圧縮試験の累積ひずみを測定し、路床土・路盤材の破壊を考慮するときの参考文献になると思われる。

- (1) Woodside, A. R., Wilson, J. and Lin, G. X. (英国)
- (2) The Distribution of Stresses at the Interface between Tyre and Road and Their Effect on Surface Chippings
- (3) pp.428~442
- (4) **タイヤ-路面間の応力分布とチップングに与える影響について** (藤田 仁)

- (5) 一般に舗装設計において考慮される交通荷重は、その接地面において均一に分布すると仮定されている。英国では幹線道路の最小キメ深さを1.5mmと規定しており、このことは、路面のチップング面は実際には仮定条件よりもさらに大きな応力下にあることを意味している。

本研究は、タイヤ-路面間およびチップング-バインダー間に発生する応力の評価を目的とし、タイヤの種類、空気圧、荷重の影響を調査している。同時に路面のキメ深さによる影響についても解析を実施している。

調査は、静的ならびに動的状態を考慮し、室内的に応力測定を行っている。特に動的な測定においては、ホイールトラッキング試験機を改良したものを使用している。いずれの測定においてもコンピュータを用いた測定、解析システムを開発し評価を行っている。

結果としてタイヤ-路面間に生じる応力は、通常の舗装設計で考慮しているものに比べ、かなり大きいことがわかり、この結果は今後のこのような材料を用いた舗装設計の改善を行う際に利用できる。また、耐すべり舗装の設

計においても有用な情報となると結論づけている。

このようなアプローチは、たとえば排水性舗装等のキメの大きな舗装についての力学解析等において有用な情報であると考えられる。

- (1) Yuce, R., Aniliatamer, U. and Bostanci, E. (トルコ)
- (2) Evaluation of Field Measurements of the Ankara-Eskisehir Flexible Experimental Road.
- (3) pp.443~455
- (4) **トルコにおける試験舗装の現場測定評価** (藤田 仁)
- (5) ヨーロッパと中東諸国を結ぶヨーロッパ自動車道計画に対応するためトルコ国内のアンカラ-エスキセヒール間においてアスファルト舗装の試験舗装を行った。この試験舗装においては、12の構造断面について評価を行ったが、その目的は次のとおりである。
  - a) 各種舗装材料、舗装構成について供用性の比較を行う。
  - b) 各種舗装材料、舗装構成について供用寿命(疲労寿命)を決定する。
  - c) ひびわれ、わだち掘れについて許容レベルを求める。
  - d) FWDとベンケルマンビームとの関係を見出す。
  - e) 舗装の補修基準を検討する。
  - f) 最適な締固めを得るための転圧方法を見出す。

調査はCBR測定やたわみ測定(FWD、ベンケルマンビーム)による構造的調査、わだち掘れ、ひびわれに関する路面調査の他に、交通量調査を行っている。また、混合物製造プラントについて骨材の含水比や運搬時の温度低下(気温35℃~5℃)、最適締固め方法等の検討を行っている。

結果としてはFWDが評価に有用なこと、セメント処理路盤はわだち掘れ対策として有効なこと、締固めにおいては初転圧と仕上げ転圧に鉄輪ローラを使用し、二次転圧に振動ローラを使用する方法が良好であること等がわかったと述べている。また、本文では、オーバーレイ設計のためのフローチャートを示している。

本報文中では試験舗装で得られた供用性の結果についてはあまり報告されていないが、締固め機種と締固め度の関係は興味深いデータである。

## Volume 4 : Construction : 施工

- (1) 著者名 (2) 原文題名 (3) ページ (4) 和文題名(抄訳者名) (5)論文概要

- (1) Caltabiano, M. A. and Rawlings, R. E. (オーストラリア)
- (2) Treatment of Reflection Cracks in Queensland
- (3) pp.1~21
- (4) **クィーンズランドにおけるリフレクションクラックの防止工法** (小笠幸雄)
- (5) 今日まで、リフレクションクラック問題を理解し、その防止工法を提案するために、多くの研究が行われてきているが、本論文は、セメント安定処理路盤および路床上に施工されるアスファルト混合物層のリフレクションクラックの防止工法について述べたものである。

ここでは、リフレクションクラック発生のメカニズムを理解するための調査試験を実施するとともに、各種防止工法の試験施工を実施し、その追跡調査結果をもとに、最適なリフレクションクラック防止工法を紹介している。

リフレクションクラックを防止するためには、舗装体内への水の侵入を防ぐことが最も重要であり、その対策方法としては、アスコン層とセメント安定処理層の間に、不透水性の材料にて中間層を施工することが効果的であると結論づけている。また、中間層に使用する材料としては、①ポリマー改質アスファルト混合物、②ジオテキスタイル、③応力吸収材等があるが、これらの中間層を2層施工するとさらに効果的であるとしている。

本研究は、オーストラリアのクィーンズランド運輸局により実施され、セメント安定処理路盤を用いたアスファルト舗装のパフォーマンス特性を理解するために実物大の載荷試験も実施している。セメント安定処理路盤を用い

たアスファルト舗装のリフレクションクラック発生のメカニズムの理解および防止工法選定に参考になる文献である。

(1) Gallenne, M.I. and Layerlc, E. (フランス)

(2) Mastering the Quality of Bituminous Pavement Courses.

(3) pp.22~36

(4) **アスファルト舗装の品質確保**

(藤田 仁)

(5) 本文で報告されている研究は、有料自動車道管理会社協会 (USAP) と施工業者およびフランス中央道路研究所 (LCPC) との共同研究として実施されたものである。これは、アスファルトフィニッシャの監視システムに関する実験であり、2つの目的を持って行われた。1つは、舗装の仕上げに到るまでの過程と舗装特性 (平坦性、密度、マクロテクスチャ) との関係を求めるものであり、またもう1つはリアルタイムの舗設監視システムの開発である。

研究はLCPC内のヤードで実際に舗装の施工を実施しながら各種調査を行っている。要因としてフィニッシャの速度や、タンパー、パイプレーターの振動数等を取りあげている。

平坦性については長い波 (波長13~40mm) については、下層路盤において、中間的な波 (波長3.3~13m) については基層において、短い波 (波長1~3.3m) については表層で制御しなければならないと述べている。また、敷均し厚と敷均め前の平坦性を自動計測しこれを管理することが重要と述べている。

本文はフィニッシャの機構的な内容を含んでおり、この意味で難解である。ただ、本会議にこのような内容の報文が提出されたことは今回の会議の性格を知る上で特徴的な報文であると思われる。

(1) Hachiya, Y., Ogishima, T. and Sato, K. (日本)

(2) Design and Construction of Sandwich Pavements for Airports on Soft Ground

(3) pp.37~48

(4) **軟弱地盤上の空港サンドイッチ舗装の設計・施工**

(八谷好高)

(5) 軟弱地盤上にアスファルト舗装を建設する場合に適していると考えられて建設されている、サンドイッチ舗装の設計法の開発過程について、新東京国際空港と東京国際空港を例にとり示している。

サンドイッチ舗装の原理は、路床直上に設けた硬い (弾性の大きい) 路盤層の効果により、路床上面に作用する荷重応力を減少させることである。この舗装形式の構造設計法がまだ確立されていないため、試験舗装上で載荷試験を実施するとともに、数値解析を行い、舗装構造を決定した。下層路盤として、新東京国際空港では山砂石灰安定処理土、東京国際空港では水砕スラグを使用して、サンドイッチ舗装が建設された。

従来のCBR法では対処できないサンドイッチ舗装を設計するために、多層弾性理論が適用されている。

(1) Hudson, W. R., Dossey, T., Harrison, R. and Goulias, D.G. (USA)

(2) End-result Smoothness Specification for Acceptance of Asphalt Concrete Pavement

(3) pp.49~63

(4) **アスファルト舗装の平坦性に関するエンドリザルト仕様**

(藤田 仁)

(5) エンドリザルト仕様は現在施工業者と発注者の間で一般的に受け入れられている。一つには、この仕様が品質管理や品質保証についての責任を明らかにするのに役立つ、また、施工業者にとっては良い仕事が利益につながり、発注者にとっては良い舗装が得られライフサイクルコストを減少させることができるという利点を有しているためである。テキサス州では、アスファルト舗装の平坦性に関するエンドリザルト仕様に際し、カリフォルニアプロファイルグラフを採用した。本文では、このプロファイルグラフについて2つの機種を比較した結果と、仕様の概要を述べている。

結果としては、ここで比較した2機種はいずれも十分利用できることがわかったと述べている。また、エンドリザルト仕様により、良好な品質の舗装に対するボーナスは全体契約費用から見ればわずかな額であり、この仕様を採用することにより、発注者は良質な舗装が得られるとともに、不良な請負者を排除できると述べている。

わが国においても、このようなエンドリザルト仕様が今後検討される機会があると思われるが、このような場合に有用な報文と考えられる。

- (1) Kandhal, P. S. Cross, S. A. and Brown, E. R. (USA)  
(2) Evaluation Of Heavy Duty Asphalt Pavements For Rutting  
(3) pp.64~78

(4) 重交通下におけるアスファルト舗装のわだちの評価

(田中耕作)

- (5) 近年、アメリカの各州において交通荷重の増加、タイヤ空気圧の増加によるホットミックスアスファルト(HMA)舗装の早期わだちが発生している。このため、これら重交通下における舗装の特性を評価する必要があった。

舗装特性を評価する為にペンシルバニア州の34ヶ所において調査が実施され気象、交通量、配合設計データ、舗装時のデータ、わだちの測定及びコアの採取が行われた。

調査データを基に統計的手法(相関分析)を用いてわだちに影響する因子の検討が行われた。解析の結果、全体的にあまり良い相関は得られなかったが、わだちに影響する主要因は確認する事ができた。すなわち、アスファルト量、混合物の空隙率、ジャイレトリセン断指数(GSI)、2.35mmふるい通過分等である。また、解析結果から重交通、タイヤ空気圧の増加によって引き起こされるHMAのわだちに対しての対策が述べられている。すなわち、材料条件として粗骨材は4.75mmふるいに残留するものを用い、粉碎された粒子が少なくとも85%以上含まれたものを用いる。細骨材については75%以上が粉碎されたものでなくてはならない。また、配合設計時の条件としては空隙率が少なくとも4.0%になるようにする。更に混合物生産時の品質管理として粒度管理の重要性を指摘している。

本文献はアメリカにおけるわだちを解析したものであるが我が国のわだち対策においても参考になるものとおもわれる。

- (1) El Halim A. E. H. O. A, Hass R., and Phang W. (カナダ)

- (2) Improving the Properties of Asphalt Pavement through the Use of AMIR Compactor : Laboratory and Field Verification

- (3) pp.79~93

(4) 新機構ローラ「AMIR」の現場および室内における評価

(川端浩平)

- (5) アスファルト舗装の転圧時に発生するクラックは、混合物の性状、温度、路盤以下の支持力およびローラの転圧方法などに起因すると考えられる。本論文では新開発のAMIR (Asphalt Multi-Intergarted Roller) の使用により、転圧クラックを防止でき、その効果としてAMIRにより転圧された混合物は、通常の転圧によるものより諸特性に優れているとしている。AMIRは、鉄輪ローラの前後輪をゴムベルトでつなぎ、一樣な荷重を与えることができるようにした転圧機械である。

まず、本論文では、砂上での転圧の比較試験より、AMIRを用いた場合、クラックの発生しないことを認め、施工時に発生するクラックは、転圧方法によるものとしている。また、各種の現場試験により、次のことが得られたとしている。①AMIRは、他の転圧機械よりも高い密度を出すことができ、混合物の間接引っ張り強度も、高い値を示す。②さらに、AMIR転圧による混合物は、曲げ強度も高い値を示す。③閉鎖した道路での2年の調査の結果、他のローラセクションが多くのクラックを発生したのに対して、AMIRによる転圧セクションでは、ほとんどクラックの発生が認められなかった。AMIRの接地圧は、通常のローラよりも10%程度小さいものとなるが、ある点における荷重のかかる時間が長いこと、さらに荷重が穏やかに均一にかけることができるため、施工時のクラックを防止し、このような有利な特性が得られるとしている。

転圧機械に関しては、振動ローラ以外あまり大きな進歩がないが、このAMIRは、たいへん興味深く、日本での開発にも十分参考になると考えられる。

- (1) Rogge, D. F., Scholz, T. V., Hicks, R. G. and Allen, D. (USA)

- (2) Asphalt Concrete Pavement Preservation with Cold In-place Recycling

- (3) pp.94~106

(4) 常温路上再生工法を用いたアスファルト舗装の補修

(鈴木秀輔)

- (5) 1984年からオレゴン州交通局(ODOT)では、ひび割れ、摩耗、路面の荒れ等の補修工事に乳剤を用いた常温路上再生工法(CIR)を適用し、1990年9月までに800kmを越える施工を行い良好な結果を得ている。ここでは、CIR適用の際の工法の選択手順を示すとともに、施工方法、実車道における供用性、再生された混合物の性状、また、加熱混合物を用いた補修との経済性等の比較結果等を報告している。

CIR適用の可否は、さまざまな条件を示した表から判断できるようにしている。また、適用箇所での乳剤の添加量

については、基準添加量を1.2%とし、これに破碎された混合物の粒度(6.4mmフルイ通過量)、アスファルト含有量、回収アスファルトの針入度または60℃粘度によって与えられる定数を加算もしくは差し引いて決定するなど(最大量1.8%、最小量0.6%)容易に決定できる工夫がなされている。

実車道における供用性も、舗装の状態、乗り心地、混合物の状態等が数種類のプロジェクトでの評価でおおむね良好であり、また、経済性についても、加熱混合物を用いたオーバーレイに比較して優れているという結果を得ている。CIRは、材料や燃料の使用を抑えるといった環境やエネルギー保護という観点からも有効な工法であるといえる。

環境問題がクローズアップされている今日、当工法は興味のある内容と思われる。

(1) Shook, J. F., Diaz, M. A. and Gardner, M. S. (USA)

(2) Performance-related Specifications for Asphalt Concrete

(3) pp.107~121

(4) **アスファルト混合物のパフォーマンスベースによる規格**

(横山 稔)

(5) 現在米国においては、約半数の州が道路技術の中に統計解析による品質保証技術を採用している。多くのこれらのシステムには、発注者の規格値を満たしていない場合、契約金額から割り引いて支払うような仕組みになっている。現状では、道路舗装のパフォーマンスベースで、この規格値が設定されているわけではなく、古くからある規格を用いて設定されているのが現状である。そこで、現行の規格(例:アスファルト量、骨材粒度、空隙率等)と道路舗装のパフォーマンスとの関係に明らかにしようと試みるものである。

まず、空隙率、最適アスファルト量からの偏差というような基礎ファクターを用いて転圧指数、復元弾性係数、引張強度、残存弾性係数、残存強度といった独立変数を数式で表現する。得られた独立変数と過去のデータベースを組み合わせて、この独立変数でパフォーマンスの予測を行う。そして、環境要因、交通要因を加え、コスト分析を行い、最適プランを作成する。こうして、パフォーマンスベースによる規格を設定する。

本研究により、アスファルト混合物の基礎ファクターを用いて、道路パフォーマンスの予測や、道路パフォーマンスの予測を行うことができるようになった。

これらの手法は、既存の舗装のデータベースがあって初めて実現できるものであり、日本においてすぐ導入できる手法ではないが、貴重な成果である。

(1) Svec, O. J. (カナダ)

(2) Application of New Compacting Technique for Deep Lifts and Large Aggregate Asphalt Mixes

(3) pp.122~136

(4) **2軸の振動輪をベルトで結んだ振動ローラの効果**

(増山幸衛)

(5) 今までのスチールローラによるアスファルト舗装の転圧は、線圧によって締固めているため、表面のヘアクラックなどが発生することがあった。この現象を回避するために、ゴムを被覆したローラがあるが、これを使用しても十分な効果は現れなかった。また最近、耐摩耗、耐荷重という点から大粒径混合物の使用が進められているが、この混合物は、配合設計にマーシャル試験が適用できないという他に、層厚が厚くなるため、転圧効果が層の下まで届かず、交通荷重による永久変形が生じてしまい、それを回避するため強振動を与えると骨材が割れてしまうという問題がある。

これらの問題を解決するため、「アスファルト多軸結合ローラ(AMIR)」という新しい考えに基づいたローラを開発し、4ヶ所の試験施工(通常2、大粒径2)と1ヶ所の実施工を行ない、効果についての確認を行なっている。

AMIRは、2軸とも振動させるタイプの振動ローラの2つローラをベルトでつないだもので、その効果として以下のものが確認されている。①面で押さえるため、表面のヘアクラックの発生を防ぐ、②ベルトで被覆しているため、起震力を大きくしても骨材が割れない、③アスファルト混合物が高温の時に荷重を加える時間が長い場合、層の下側も荷重の効果が伝わる。

わが国でも最近、排水性舗装など開粒タイプの混合物が施工されているため、骨材の割れを防止するなどの点から、興味深いローラである。

路床の構築

アスファルト舗装要綱(平成4年12月)(以下新要綱という)では、アスファルト舗装の構成は図-1に示す各層を定義しており、路床とは舗装の下の厚さ約1m部分を指し、舗装と一体となって交通荷重を支持し、さらに路床の下部にある路体に対して交通荷重をほぼ一定に分散する役割をはたすとしています。

そして、路床の構築とは目標とする路床の支持力を設定し、路床改良工法の選定を行い、合わせて排水構造や凍結・融解に対する措置を行うことと定義しています。

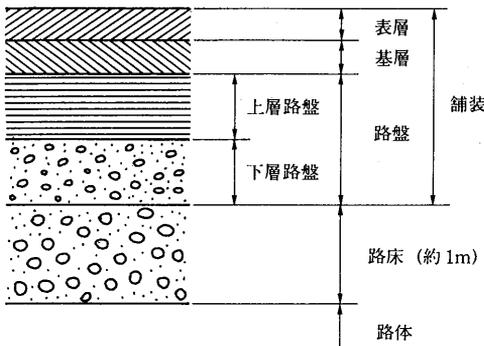


図-1 アスファルト舗装の構成と各層の名称  
(社)日本道路協会

これまでの要綱では、路床は自然状態で存在する地盤を対象とすることからいわゆる与えられたものとして考えられていましたが、新要綱では舗装の構造設計で評価する設計交通量を ①大型車交通量による方法と、②走行車両の輪荷重による方法を取り入れ、特に後者の場合、設計期間を原則10年にこだわらずに設定できる方法にしているため、設計期間に応じた舗装厚決定に反映するためには質の高い路床が必要になることから、路床の構築の考えがとり入れられました。

路床の構築を具体的にを行う場合とは、次の4つの条件のいずれかに該当する場合であり、表-1を参考に工法選定を行うようにしています。

- ①路床の設計CBRが3未満の場合
- ②路床の排水や凍結融解に対する対応策をとる必要がある場合
- ③舗装の仕上がり高さが制限される場合
- ④路床を改良した方が経済的な場合

路床の支持力の設定は、経験的には関東ローム原路床(切・盛土)ではベンケルマンピームによるたわみ量(輪荷重 $P=5t$ )は $d=8\sim 22mm$ 、 $K_{30}$ 値として、 $2\sim 7\text{ kgf/cm}^2$ 程度を、山砂による置換え路床ではそれぞれ $7\sim 13mm$ 、 $4\sim 8\text{ kgf/cm}^2$ 程度の範囲にあるとする報告もあるが、路床の構築の場合は最終的には多層弾性理論解析によるチェックから決めている例が多い。

またCBRの目安は、L・A交通では3%、B交通以上は8%を設定している例が多い。

表-1 路床・路盤の築造工法

工 法	適 用	路 床	下層路盤	上層路盤
切土		○		
盛土		○		
セメント安定処理工法		○	○	○
石灰安定処理工法		○	○	○
置換工法		○		
粒状路盤工法			○	
粒度調整工法				○
瀝青安定処理工法				○
セメント・瀝青安定処理工法				○

(注) 上記以外の工法でも、耐久性の確認されているものは採用してもよい。

[小島逸平 熊谷道路(株)技術研究所]

クアラゴン評価（舗装用アスファルトの実用的な品質評価システム）

アスファルトは、代表的な混合物である密粒度アスコンの場合で混合物中に容積比で5～7%を占めるに過ぎないが、耐久性のある粘弾性的な結合材として極めて重要な役割を果たしている。一方、舗装用アスファルトに対する品質要求としては、交通量・輪荷重の増大、及び良質骨材の入手難といった悪条件が重なる中で、一段と高まる傾向にある。

こうした中で、この度紹介するクアラゴン評価（以下QUALAGON）は、石油メーカーが舗装用アスファルトを製造する際の原油選定や製造条件設定等の品質計画に、また製造中の品質管理に有効な評価システムであると考えられる。QUALAGONは、1989年10月にスペインのマドリッドで開催された第4回ユーロピチュム・シンポジウムでシェルグループのアムステルダム研究所及びロンドン本社が共同で発表した研究論文で紹介されたものである。

内容としては、アスファルト単体に関する評価項目が6つ、混合物に関する評価項目が3つの合計9項目で構成されており、これらが図-1に示すように9角形の図形で表わされている。各グレード毎にそれぞれ

の基準値が図形の境界線上に示され、中心から外側に向かって出た放射状の線上に性状値の目盛りがふられている。従って、測定値をその中にプロットするだけで、品質的に優れた舗装用アスファルトを製造するための諸条件を見出すのに極めて役立つものと考えられる。

実験用試作品及び市販品について行ったアスファルト性状と供用性能に関する長期にわたる研究結果から、QUALAGON図形の内側にプロットされるような品質を持ったアスファルトが舗装用に好ましいと述べられている。

この研究を着手するにあたっては、過去に蓄積した膨大な実験データを基に、舗装用アスファルトに必要な品質に関する概念を次のように想定している。

- ① レオロジー
- ② 凝集性
- ③ 付着性
- ④ 耐久性

これらの中で、①のレオロジーについては過去の多くの研究成果によりその重要性は既に明らかとなっている

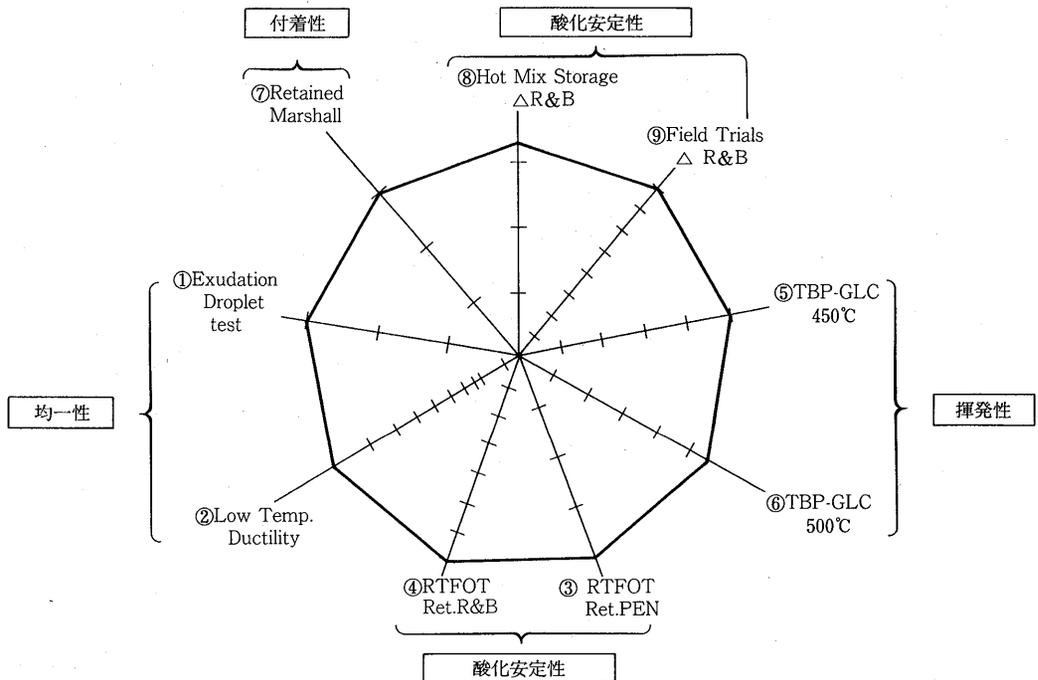


図-1 クアラゴン評価のための9角形図形

る。このため、②～④までについてそれらが持つ意義を以下に述べることにする。

#### 凝集性

凝集性はアスファルトの結合力を表すもので、低温伸度によって測定できる。舗装用に適したアスファルトであるか否かを判断するのに有効である。試験温度はグレードによって異なり、80～100では10℃、60～70では13℃、40～50では17℃である。

#### 付着性

付着性は、ホコリや水が存在するような悪条件下でアスファルトが化学的に異なる骨材への付着する能力を表わす。特に混合物の付着性を大きく左右する水の影響については、マーシャル安定度試験の7日間水浸後の残留安定度によって測定できる。また、滲み出し試験は直接的ではないが、アスファルトの実質的な付着性を評価するものとして有効な方法である。

#### 耐久性

耐久性は、長期の供用条件下でレオロジー、凝集性、付着性等が維持できる能力と定義できる。耐久性に関する因子を分類すると次のように表わされる。

- ・酸化による硬化
- ・揮発分の蒸発による硬化
- ・滲み出しによる硬化
- ・物理的な硬化
- ・くり返し荷重による疲労

空隙率が4%以上の混合物でのアスファルトの老化は、酸化による硬化と揮発分の蒸発による硬化により大きく支配される。酸化による硬化は、回転式薄膜加熱試験で求める残留針入度と残留軟化点で評価する。蒸発による硬化は、実験室規模の減圧蒸留装置に代わる精密ガス・液体クロマトグラフィー分析により測定する450℃及び500℃の沸点温度での揮発分留出量で評価する。

これまでに述べてきたQUALAGONについて、それを構成する9項目の評価試験を紹介すると次の通りである。

- ① 滲み出し試験 (シェル試験法 2697)  
(Exudation Droplet Test)
- ② 低温伸度 (ASTM D113)  
(Low Temperature Ductility)
- ③ 回転式薄膜加熱試験による針入度残留率  
(ASTM D2872)  
(Rolling Thin Film Oven Test)
- ④ 回転式薄膜加熱試験による軟化点残留率  
(ASTM D2872)  
(Rolling Thin Film Oven Test)
- ⑤ 450℃における精密ガス・液体クロマトグラフィー分析 (シェル試験法 2551)  
(True-Boiling-Point Gas-Liquid-Chromatgraphie)
- ⑤ 500℃における精密ガス・液体クロマトグラフィー分析 (シェル試験法 2551)  
(True-Boiling-Point Gas-Liquid-Chromatgraphie)
- ⑦ 水浸マーシャル安定度試験 (ASTM D1559)  
(Retained Marshall Stability Test)
- ⑧ 加熱混合物貯蔵試験  
(HOT Mix Storage Test)
- ⑨ 合材から抽出・回収後の軟化点試験

QUALAGONの研究から得られた知見として、舗装用アスファルトにとっては分子量分布や化学的組成や物理的性状等の品質のバランスが極めて重要であると指摘している。また、その活用方法として、アスファルトの性質を系統的に理解するためと、石油メーカーが品質計画・品質管理に基づく独自の品質保証に役立つものであると述べている。

[板垣和芳：昭和シェル石油(株)中央研究所]

総目次 第171号～第174号 (平成4年度)

アスファルトの研究〔品質・規格・試験など〕

表 題	執 筆 者	号数	ページ P～P	発行年月 (西暦)
特集・アスファルトの多様な用途 特集にあたって 地下の防水 アスファルトマスチックを用いた連続止水壁工法と空隙入りアスファルトマスチックについて 木造住宅用床防音材 ビル建設関連用途におけるアスファルトの応用 防蟻剤、野兎忌避剤へのアスファルトの利用 タイルカーペット 鉄道軌道に用いられるセメントアスファルトモルタル	飯 島 博彦 所 部 武彦 建 部 英博 米 田 憲夫 青 木 秀樹 脇 阪 三郎 梶 川 晃男 鳥 取 誠一	171	1 2～7 8～12 13～17 18～19 20～24 25～28 29～33	平成4.4 (1992)
<資料> 平成3年市販アスファルトの性状調査	技 術 委 員 会	173	100～103	平成4.10 (1992)

アスファルト需給・統計関係の解析

表 題	執 筆 者	号数	ページ P～P	発行年月 (西暦)
主な石油アスファルト製造用原油の輸入状況		172	72	平成4.7 (1992)
(統計資料：石油アスファルト需給統計その1 (総括表)，同その2 (内需，品種別表) 毎号巻末に掲載)				

道路舗装・舗装用アスファルト

表 題	執 筆 者	号数	ページ P～P	発行年月 (西暦)
特集・再生資源の利用と舗装の係わり 特集にあたって 再資源化法の概要とリサイクルへの取り組み 産業廃棄物処理施設の整備に向けて 舗装と再生資源 舗装廃材再生利用技術指針(案)の改訂に当たっての検討事項について アスファルトコンクリート発生材の管理と品質 コンクリート発生材の道路用材としての利用  東京ガスの道路廃材再生総合システムについて 発生残土の再利用	奥 野 晴彦 橋 場 克司 三 本 木 徹 山 田 優 辻 保 人  吉 兼 亨 建試協・コンクリート分 科会報告 棕 本 宏・水谷好一 仮屋義信 木 村 知 道 万波一朗・木村 圭	172	1 2～5 6～9 10～16 17～19 20～27 28～36 37～41 42～46	平成4.7 (1992)
特集・高速道路における舗装技術の現況と新たな取組み わが国の高速道路 高速自動車国道網整備の計画について 日本道路公団における舗装技術の現況と新たな取組み 首都高速道路公団における舗装技術の現況と新たな取組み 阪神高速道路公団における舗装技術の現況と新たな取組み 本州四国連絡橋公団における舗装技術の現況と新たな取組み	橋 本 鋼太郎 芝 村 善治 青木秀郎・鶴窪廣洋 中 島 拓 橋本良之・杉山 功 藤井 裕司・長尾日出男	173	1～2 3～7 8～36 37～45 46～55 56～66	平成4.10 (1992)
特集・座談会とQ&A 座談会 アスファルトをかたる Q&A	司会 飯 島 尚	174	1～24 25～49	平成5.1 (1993)
海外報告・第5回ユーラスファルト国際会議の概要報告	野 村 敏 明	174	70～79	平成5.1 (1993)

## アスファルト舗装技術研究グループ・研究報告

表 題	執 筆 者	号数	ページ P～P	発行年月 (西暦)
アスファルト舗装工学の発展を目指して(8) 各国のアスファルト舗装設計法の現状と研究の動向	姫 野 賢 治 峰岸 順一・鈴木 秀輔 田中 耕作・湯川ひとみ	171	34 35～42	平成4.4 (1992)
アスファルト舗装工学の発展を目指して(9) 舗装管理システムの現況	姫 野 賢 治 藤田 仁・岡藤博国 田中耕作・増山幸衛 南沢輝雄	172	47 48～65	平成4.7 (1992)
アスファルト舗装工学の発展を目指して(10) ひびわれの評価 わだち掘れの評価 平坦性の評価とモデルによる車両の挙動の解析 路面の総合的評価の現状	姫 野 賢 治 南 沢 輝 雄 峰岸 順一・佐々木 巖 野村健一郎・山本 達哉 野 村 敏 明	173	67 68～72 73～78 79～90 91～95	平成4.10 (1992)
「第7回・アスファルト舗装に関する国際会議」の論文抄録	姫野賢治・アスファルト 舗装技術研究グループ	174	50～69	平成5.1 (1993)

## 用語の解説

表 題	執 筆 者	号数	ページ P～P	発行年月 (西暦)
インターロッキングブロック (舗装) 熱可塑性エラストマー	小 島 逸 平 (舗装関係)	171	43～44 45～46	平成4.4 (1992)
推定針入度 熱可塑性エラストマー・ポリスチレン系エラストマー		172	66～67 68～69	平成4.7 (1992)
凍結抑制舗装 熱可塑性エラストマー・オレフィン系エラストマー	板 垣 和 芳 見 玉 充 生 (石油アスファルト関係)	173	96～97 98～99	平成4.10 (1992)
切削深さ、オーバーレイ厚 熱可塑性エラストマー・ウレタン系エラストマー		174	80～81 82	平成5.1 (1993)

## その他一般〔協会事業活動・時事解説・随想など〕

表 題	執 筆 者	号数	ページ P～P	発行年月 (西暦)
総目次 第167号～第170号 (平成3年度)	編 集 委 員 会	171	47～48	平成4.4 (1992)

## 平成4年度に発行された本協会出版物

書 名	概 要	発行年月 (西暦)
アスファルト統計史 (昭和62年度～平成3年度) (B5版・本文55ページ) 毎年(月)改訂している定期刊行物		平成4.12(1992)
I. アスファルト・ポケットブック (ポケットブック版・本文76ページ)		毎年8月発行
II. 日本のアスファルト事情 (A5版・本文50ページ)		毎年10月発行
III. 石油アスファルト統計月報 (B5版・本文16ページ)		毎月1日発行

<石油アスファルト需給統計資料> その1

石油アスファルト需給実績 (総括表)

(単位: 千 t)

項目 年度	供					需					
	期初在庫	生産	対前年 度比	輸入	合計	内需	対前年 度比	輸出	小計	期末在庫	合計
55年度	236	4,720	(93.2)	1	4,957	4,703	(91.6)	21	4,724	240	4,964
56年度	240	4,598	(97.4)	0	4,838	4,562	(97.0)	19	4,581	226	4,807
57年度	226	4,624	(99.2)	0	4,850	4,575	(100.3)	18	4,593	213	4,806
58年度	213	4,947	(108.4)	0	5,160	4,921	(107.6)	4	4,925	226	5,151
59年度	226	5,235	(105.9)	0	5,461	5,221	(106.1)	0	5,221	240	5,461
60年度	240	5,029	(96.1)	0	5,269	5,035	(96.4)	0	5,035	215	5,250
61年度	215	5,744	(114.2)	0	5,959	5,695	(113.1)	0	5,696	235	5,931
62年度上期	235	2,745	(103.4)	7	2,987	2,681	(104.4)	0	2,681	312	2,993
62年度下期	312	3,146	(101.8)	2	3,460	3,181	(101.7)	0	3,181	274	3,455
62年度	235	5,892	(102.6)	9	6,136	5,862	(102.9)	0	5,862	274	6,136
63年度上期	274	2,754	(100.3)	3	3,031	2,734	(102.0)	1	2,735	287	3,022
63年度下期	287	3,150	(100.1)	0	3,437	3,219	(101.2)	0	3,219	219	3,438
63年度	274	5,904	(100.2)	3	6,181	5,953	(101.6)	1	5,954	219	6,173
元年度上期	219	2,895	(105.1)	1	3,115	2,732	(99.9)	1	2,733	372	3,105
元年度下期	372	3,170	(100.6)	0	3,542	3,258	(101.2)	3	3,261	276	3,537
元年度	219	6,066	(102.7)	1	6,286	5,990	(100.6)	4	5,994	276	6,270
2年度上期	276	3,046	(105.2)	0	3,322	2,974	(108.9)	5	2,979	323	3,302
2年度下期	321	3,231	(101.9)	1	3,553	3,231	(99.1)	3	3,234	310	3,544
2年度	276	6,277	(103.5)	1	6,554	6,205	(103.6)	8	6,213	310	6,523
7~9月	288	1,453	(92.0)	0	1,741	1,430	(94.8)	6	1,436	302	1,738
3年度上期	310	2,844	(93.4)	0	3,154	2,841	(95.5)	6	2,847	302	3,149
10月	302	513	(92.6)	0	815	521	(90.5)	6	527	288	815
11月	288	531	(99.3)	0	819	549	(98.0)	3	552	267	819
12月	267	552	(93.1)	0	819	568	(92.1)	3	571	248	819
10~12月	302	1,596	(94.9)	0	1,898	1,638	(93.4)	12	1,650	248	1,898
4. 1月	248	396	(100.0)	0	644	366	(97.1)	0	366	277	643
2月	277	463	(95.7)	0	740	461	(103.6)	0	461	279	740
3月	279	673	(100.7)	0	952	630	(96.0)	0	630	321	951
1~3月	248	1,532	(99.0)	0	1,780	1,457	(98.6)	0	1,457	321	1,778
3年度下期	302	3,128	(96.8)	0	3,430	3,095	(95.8)	12	3,107	321	3,428
3年度	310	5,972	(95.1)	0	6,282	5,936	(95.7)	18	5,954	321	6,275
4. 4月	321	523	(98.7)	0	844	510	(96.0)	7	517	326	843
5月	326	460	(104.8)	0	786	423	(96.1)	23	446	340	786
6月	340	473	(111.8)	0	813	486	(110.2)	17	503	310	813
4~6月	321	1,456	(104.6)	0	1,777	1,419	(100.5)	47	1,466	310	1,776
7月	310	494	(98.0)	0	804	517	(104.7)	15	532	272	804
8月	272	515	(109.6)	0	787	442	(97.8)	6	448	335	783
9月	335	503	(105.0)	0	838	512	(105.8)	0	512	326	838
7~9月	310	1,512	(104.1)	0	1,822	1,471	(102.9)	21	1,492	326	1,818
4年度上期	321	2,968	(104.4)	0	3,289	2,890	(101.7)	68	2,958	326	3,284
10月	326	502	(97.9)	0	828	499	(95.8)	80	507	321	828
11月	321	553	(104.1)	0	874	571	(104.0)	40	575	299	874

(注) (1) 通産省エネルギー生産・需給統計月報 4年11月確報

(2) 四捨五入のため月報と一致しない場合がある。

<石油アスファルト需給統計資料> その2

石油アスファルト内需実績 (品種別明細)

(単位:千t)

項目 年度	内 需 量						対 前 年 度 比					
	ストレート・アスファルト			燃焼用 アスファルト	ブローン アスファルト	合 計	ストレート・アスファルト			燃焼用 アスファルト	ブローン アスファルト	合 計
	道路用	工業用	計				道路用	工業用	計			
55年度	4,233	183	4,416	—	287	4,703	91.7	103.4	92.1	—	91.5	91.6
56年度	4,082	202	4,284	4	274	4,562	96.4	110.4	97.0	—	95.5	97.0
57年度	3,943	185	4,128	187	260	4,575	96.6	91.6	96.4	467.5	94.2	100.3
58年度	3,950	177	4,127	540	254	4,921	100.2	95.7	100.0	288.8	98.4	107.6
59年度	3,999	162	4,161	806	254	5,221	101.2	91.5	100.8	149.3	100.0	106.1
60年度	3,739	139	3,878	911	246	5,035	93.5	85.8	93.2	113.0	96.9	96.4
61年度	3,979	241	4,220	1,238	237	5,695	106.4	173.4	108.8	135.9	96.3	113.1
62年度上期	1,949	98	2,047	520	114	2,681	106.8	148.5	108.2	92.0	101.8	104.4
62年度下期	2,304	261	2,565	475	141	3,181	106.9	149.1	110.1	70.6	112.8	101.7
62年度	4,253	359	4,612	995	255	5,862	106.9	149.0	109.3	80.4	107.6	102.9
63年度上期	1,987	166	2,153	464	117	2,734	101.9	169.4	105.2	89.2	102.6	102.0
63年度下期	2,319	255	2,574	504	141	3,219	100.7	98.1	100.4	106.1	100.0	101.2
63年度	4,306	421	4,727	968	258	5,953	101.2	117.3	102.5	97.3	101.2	101.6
元年度上期	2,043	151	2,194	423	115	2,732	102.8	91.0	101.9	91.2	98.3	99.9
元年度下期	2,317	296	2,613	509	136	3,258	99.9	116.1	101.5	101.0	96.5	101.2
元年度	4,360	447	4,807	932	251	5,990	101.2	106.2	101.7	96.3	97.3	100.6
2年度上期	2,149	269	2,418	432	124	2,974	105.2	178.1	110.2	101.9	108.7	108.9
2年度下期	2,267	337	2,604	497	130	3,231	97.8	113.9	99.7	97.6	95.6	99.2
2年度	4,416	606	5,022	929	254	6,205	101.3	135.6	104.5	99.7	101.2	103.6
7～9月	1,024	165	1,189	185	56	1,430	96.5	107.2	97.9	80.8	87.5	94.8
3年度上期	2,090	268	2,358	372	111	2,841	97.3	99.6	97.5	86.1	89.5	95.5
10月	383	48	431	68	22	521	93.9	77.4	91.7	84.0	88.0	90.5
11月	415	48	463	61	25	549	100.7	114.3	102.0	73.5	108.7	98.0
12月	411	53	464	82	22	568	92.8	89.8	92.4	87.2	104.8	92.1
10～12月	1,209	149	1,358	211	69	1,638	95.7	91.4	95.2	81.8	100.0	93.4
4. 1月	223	54	277	70	19	366	101.8	100.0	101.5	83.3	95.0	97.1
2月	315	52	367	72	22	461	106.1	94.5	104.3	101.4	100.0	103.6
3月	472	67	539	71	20	630	96.9	103.1	97.6	84.5	100.0	96.0
1～3月	1,010	173	1,183	213	61	1,457	100.7	99.4	100.5	89.1	98.4	98.6
3年度下期	2,219	322	2,541	424	130	3,095	97.9	95.5	97.6	85.3	100.0	95.8
3年度	4,309	590	4,899	796	241	5,936	97.6	97.4	97.6	85.7	94.9	95.7
4. 4月	410	10	420	71	19	510	98.1	100.0	98.1	83.5	105.6	96.0
5月	300	44	344	60	19	423	92.0	97.8	92.7	120.0	100.0	96.1
6月	354	67	421	46	19	486	109.3	139.6	113.2	90.2	105.6	110.2
4～6月	1,064	121	1,185	177	57	1,419	99.6	117.5	101.2	95.2	103.6	100.5
7月	393	40	433	64	20	517	105.6	71.4	101.2	136.2	105.3	104.7
8月	321	36	357	68	17	442	101.3	69.2	96.7	95.6	94.4	97.8
9月	373	55	428	63	21	512	111.0	98.2	109.2	86.3	110.5	105.8
7～9月	1,087	131	1,218	195	58	1,471	106.2	79.4	102.4	105.4	103.6	102.9
4年度上期	2,151	252	2,403	372	115	2,890	102.9	94.0	101.9	100.0	103.6	101.7
10月	400	23	423	54	22	499	104.4	47.9	98.1	79.4	100.0	95.8
11月	420	56	476	72	23	571	101.2	116.7	102.8	118.0	92.0	104.0

- (注) (1) 通産省エネルギー生産・需給統計月報 4年11月確報  
(2) 工業用ストレート・アスファルト, 燃焼用アスファルト, ブローンアスファルトは日本アスファルト協会調べ。  
(3) 道路用ストレート・アスファルト=内需量合計-(ブローンアスファルト+燃焼用アスファルト+工業用ストレート・アスファルト)  
(4) 四捨五入のため月報と一致しない場合がある。

---

アスファルト統計史 B 5 版・187ページ

アスファルト統計史(昭和62年度～平成3年度) B 5 版・55ページ

実費頒価

「アスファルト統計史」+「アスファルト統計史(昭和62年度～平成3年度)」¥3,000(送料実費)  
「アスファルト統計史(昭和62年度～平成3年度)」のみ ¥500(送料実費)

申込先 (社)日本アスファルト協会  
〒105 東京都港区虎ノ門2-6-7  
和孝第10ビル

---

我が国において、アスファルトが利用されてきたのは紀元前にまでさかのぼることが出来ます。

当時の利用目的は、防水・接着剤等に用いられていたようですが、今日では、道路用を始めとして工業用・燃焼用と色々な用途に用いられるようになり、需要量も増大してまいりました。

当協会の調査委員会において、我が国のアスファルト統計について資料の収集・整理に努めて参り、「アスファルト統計史」を30周年記念として昭和62年12月に出版し、「アスファルト統計史(昭和62年度～平成3年度)」を平成4年12月に出版いたしました。

アスファルトに関する統計としては、我が国唯一の資料であり、内容的にもきめ細かく取りまとめられており、関係者必携の書としておすすめします。

---

目 次

---

I. 生産量

1. アスファルト年別生産量
2. アスファルト品種別月別生産量
3. 石油アスファルト月別生産量
4. 石油アスファルト品種別月別生産量

II. 内需量(販売)

1. アスファルト販売量
2. アスファルト品種別月別販売量
3. 石油アスファルト月別内需量
4. 石油アスファルト品種別月別内需量

III. 輸出入

1. アスファルト年別輸入・輸出量
2. アスファルト月別輸入・輸出量

IV. 在庫量

1. 石油アスファルト年別在庫量
2. 石油アスファルト月別在庫量
3. 石油アスファルト品種別月別在庫量

V. 販売量

1. 石油アスファルト品種別針入度販売量
2. 石油アスファルト品種別荷姿別販売量
3. 石油アスファルト地域別月別販売量

---

# フルデプス・アスファルト舗装設計施工指針（案）

B 5 版・42ページ・実費頒価 ¥800（送料実費）

申込先（社）日本アスファルト協会  
〒105 東京都港区虎ノ門2-6-7  
和孝第10ビル

---

路床の上のすべての層にアスファルト混合物を用いたフルデプス・アスファルト舗装は、昭和40年代半ばから積極的な試みとして市街地道路を中心にシックリフト工法により施工され、実施例は数十例に及んでいます。

弊協会のアスファルト舗装技術委員会においてフルデプス舗装の厚さ設計の基準化とシックリフト工法の標準化に関して鋭意検討され、ここに「フルデプス・アスファルト舗装設計施工指針（案）」がとりまとめられ出版されました。

フルデプス舗装は、舗装厚が薄く、工種が単一化されることから、工期が非常に制約される箇所等に適用して有効であるが、また、アスファルト舗装の修繕に伴って発生する舗装廃材の利用方法の一つとして、フルデプス舗装の路盤への再生加熱アスファルト混合物の利用が考えられ、省資源の観点から今後普及する可能性も大きい。

本指針（案）を、フルデプス舗装の設計施工に従事する関係者必読の書としておすすめします。

---

## 目 次

---

1. 総 説	3-4	アスファルト混合物
1-1 フルデプス・アスファルト舗装の定義	4	4. 路床および路盤
1-2 適用範囲	4-1	4-1 概 説
2. 構造の設計	4-2	4-2 路 床
2-1 舗装の構造	4-3	4-3 路 盤
2-2 設計の方法	5	5. 表層および基層
2-3 排 水	6	6. 品質管理および検査
3. 材 料	6-1	6-1 概 説
3-1 概 説	6-2	6-2 出来形および品質の管理
3-2 歴青材料	6-3	6-3 検 査
3-3 骨 材	7	7. 記 録

---

# 改質アスファルトを用いた混合物の設計・施工の手引き

B 5 版・37ページ・実費頒価 ¥ 500 (送料実費)

申込先 (社) 日本アスファルト協会  
〒105 東京都港区虎ノ門2-6-7  
和孝第10ビル

---

改質アスファルトは、アスファルト舗装の耐久性向上を目的として、舗装用石油アスファルトの性質を改善したアスファルトで、改質方法によってその性能も多様です。したがって、これを十分に理解したうえで利用しなければ、その機能を十分に発揮させられないところがあります。

そこで、(株)日本アスファルト協会では、改質アスファルトを使用する場合の適用場所の選定をはじめ、混合物の製造および施工についての手引きをとりまとめました。

この手引きは、わが国における現今の改質アスファルトに関する標準的な技術を示したもので関係者必読の書としておすすめします。

---

## 目 次

---

- |                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| 1. 総 説              | 5.3 最適アスファルト量の決定       |
| 1.1 概 説             | 5.4 流動対策               |
| 1.2 本手引きの適用にあたっての注意 | 5.5 摩耗対策               |
| 2. 改質アスファルト         | 5.6 すべり対策              |
| 2.1 分 類             | 5.7 その他                |
| 2.2 特 徴             | 6. 混合物の製造・運搬           |
| 2.3 品質規格            | 6.1 概 説                |
| 3. アスファルト混合物の破損と対策  | 6.2 改質アスファルトおよび改質材料の準備 |
| 3.1 概 説             | 6.3 混合物の製造の準備          |
| 3.2 流 動             | 6.4 混合物の製造・貯蔵・運搬       |
| 3.3 摩 耗             | 7. 混合物の舗設              |
| 3.4 すべり             | 7.1 概 説                |
| 3.5 その他             | 7.2 舗設準備               |
| 4. 改質アスファルトの適用      | 7.3 プライムコートおよびタックコート   |
| 4.1 一般地域における適用      | 7.4 舗設温度               |
| 4.2 積雪寒冷地域における適用    | 7.5 敷きならし              |
| 4.3 特殊箇所における適用      | 7.6 締固め                |
| 5. 配合設計             | 7.7 継 目                |
| 5.1 概 設             | 7.8 寒冷期の施工             |
| 5.2 配合設計における確認試験    | 8. 管理と検査               |

社名	住所	電話
〔メーカー〕		
出光興産株式会社	(100) 千代田区丸の内3-1-1	03 (3213) 3 1 3 4
エッソ石油株式会社	(107) 港区赤坂5-3-3	03 (3585) 9 4 3 8
鹿島石油株式会社	(102) 千代田区紀尾井町3-6	03 (5276) 9 5 5 6
キグナス石油株式会社	(104) 中央区京橋2-9-2	03 (3535) 7 8 1 1
キグナス石油精製株式会社	(210) 川崎市川崎区浮島町3-1	044 (288) 8 4 4 5
九州石油株式会社	(100) 千代田区内幸町2-1-1	03 (3502) 3 6 5 1
極東石油工業株式会社	(100) 千代田区大手町1-7-2	03 (3270) 0 8 4 1
興垂石油株式会社	(100) 千代田区大手町2-6-2	03 (3241) 8 6 3 1
コスモ石油株式会社	(105) 港区芝浦1-1-1	03 (3798) 3 1 2 1
三共油化工業株式会社	(100) 千代田区丸の内1-4-2	03 (3284) 1 9 1 1
昭和シェル石油株式会社	(100) 千代田区霞が関3-2-5	03 (3503) 4 0 7 6
昭和四日市石油株式会社	(510) 四日市市塩浜町1	0593 (45) 2 1 1 1
西部石油株式会社	(100) 千代田区丸の内1-2-1	03 (3215) 3 0 8 1
ゼネラル石油株式会社	(105) 港区西新橋2-8-6	03 (3595) 8 4 1 0
東燃株式会社	(100) 千代田区一ツ橋1-1-1	03 (3286) 5 1 1 1
東北石油株式会社	(985) 仙台市宮城野区港5-1-1	022 (363) 1 1 2 2
株式会社 日 鉱 共 石	(105) 港区虎ノ門2-10-1	03 (3505) 6 4 2 1
日本石油株式会社	(105) 港区西新橋1-3-12	03 (3502) 1 1 1 1
日本石油精製株式会社	(105) 港区西新橋1-3-12	03 (3502) 1 1 1 1
富士興産株式会社	(100) 千代田区永田町2-4-3	03 (3580) 3 5 7 1
富士石油株式会社	(100) 千代田区大手町1-2-3	03 (3211) 6 5 3 1
三菱石油株式会社	(105) 港区虎ノ門1-2-4	03 (3595) 7 4 1 3
モービル石油株式会社	(100) 千代田区大手町1-7-2	03 (3244) 4 6 9 1
〔ディーラー〕		
● 北海道		
コスモアスファルト(株)札幌支店	(060) 札幌市中央区大通り西10-4	011 (281) 3 9 0 6 コ ス モ
ツタイ石油商事株式会社	(064) 札幌市中央区南4条西11-1292-4	011 (518) 2 7 7 1 コ ス モ
株式会社 トーアス札幌営業所	(060) 札幌市中央区北2条西2	011 (281) 2 3 6 1 日 鉱 共 石
東光商事株式会社札幌営業所	(060) 札幌市中央区南大通り西7	011 (241) 1 5 6 1 三 石
中西瀝青株式会社札幌営業所	(060) 札幌市中央区北2条西2	011 (231) 2 8 9 5 日 石
株式会社 南部商会札幌営業所	(060) 札幌市中央区北2条西2-15	011 (231) 7 5 8 7 日 石
株式会社 ロード資材	(060) 札幌市中央区北1条西10-1-11	011 (281) 3 9 7 6 コ ス モ
● 東北		
株式会社 男 鹿 興 業 社	(010-05) 男鹿市船川港船川字埋立地1-18-2	0185(23) 3 2 9 3 日 鉱 共 石

社団法人 日本アスファルト協会 会員

社名	住所	電話
カメイ株式会社	(980) 仙台市青葉区国分町3-1-18	022 (264) 6 1 1 1 日 石
コスモアスファルト(株)仙台支店	(980) 仙台市青葉区中央3-3-3	022 (266) 1 1 0 1 コ ス モ
正興産業株式会社 仙台営業所	(980) 仙台市青葉区国分町3-3-5	022 (263) 5 9 5 1 三 石
竹中産業株式会社 新潟営業所	(950) 新潟市東大通1-4-2	025 (246) 2 7 7 0 昭和シェル
株式会社 トーアス仙台営業所	(980) 仙台市青葉区大町1-1-10	022 (262) 7 5 6 1 日 鉦 共 石
常盤商事株式会社仙台支店	(980) 仙台市青葉区錦町1-10-11	022 (224) 1 1 5 1 三 石
中西瀝青株式会社 仙台営業所	(980) 仙台市青葉区中央2-1-30	022 (223) 4 8 6 6 日 石
株式会社 南部商会仙台営業所	(980) 仙台市青葉区中央2-1-17	022 (223) 1 0 1 1 日 石
ミヤセキ株式会社	(980) 仙台市宮城野区榴岡2-3-12	022 (257) 1 2 3 1 三 石
菱油販売株式会社仙台支店	(980) 仙台市青葉区国分町3-1-1	022 (225) 1 4 9 1 三 石
● 関 東		
朝日産業株式会社	(103) 中央区日本橋茅場町2-7-9	03 (3669) 7 8 7 8 コ ス モ
アスファルト産業株式会社	(104) 中央区八丁堀4-11-2	03 (3553) 3 0 0 1 昭和シェル
伊藤忠商事株式会社	(107) 港区北青山2-5-1	03 (3497) 6 5 4 8 九 石
伊藤忠燃料株式会社	(107) 港区赤坂2-17-22	03 (3584) 8 5 2 1 日 鉦 共 石
梅本石油株式会社	(162) 新宿区揚場町2-24	03 (3269) 7 5 4 1 コ ス モ
エムシー・アスファルト株式会社	(100) 千代田区内幸町1-3-3	03 (5251) 2 0 6 0 三 石
株式会社 木畑商会	(104) 中央区八丁堀4-2-2	03 (3552) 3 1 9 1 日 鉦 共 石
共立石油株式会社	(101) 千代田区神田西福田町3	03 (3256) 6 3 5 5 日 鉦 共 石
株式会社 ケイエム商運	(103) 中央区八重洲1-8-5	03 (3245) 1 6 3 1 三 石
コスモアスファルト株式会社	(104) 中央区八丁堀3-3-5	03 (3551) 8 0 1 1 コ ス モ
国光商事株式会社	(164) 中野区東中野1-7-1	03 (3363) 8 2 3 1 出 光
株式会社澤田商行関東支店	(104) 中央区入船町1-7-2	03 (3551) 7 1 3 1 コ ス モ
三徳商事株式会社東京支店	(101) 千代田区神田紺屋町11	03 (3254) 9 2 9 1 昭和シェル
新日本商事株式会社	(101) 千代田区神田錦町2-5	03 (3294) 3 9 6 1 昭和シェル
住商石油アスファルト株式会社	(105) 港区浜松町2-3-31	03 (3578) 9 5 2 1 出 光
竹中産業株式会社	(101) 千代田区鍛冶町1-5-5	03 (3251) 0 1 8 5 昭和シェル
中央石油株式会社	(160) 新宿区新宿2-6-5	03 (3356) 8 0 6 1 モービル
株式会社 トーアス	(160) 新宿区西新宿2-7-1	03 (3342) 6 3 9 1 日 鉦 共 石
東京レキセイ株式会社	(150) 渋谷区恵比寿西1-9-12	03 (3496) 8 6 9 1 富 士 興
東京富士興産販売株式会社	(105) 港区虎ノ門1-13-4	03 (3591) 3 4 0 1 富 士 興
東光商事株式会社	(104) 中央区京橋2-1-4	03 (3274) 2 7 5 1 三 石
東新瀝青株式会社	(103) 中央区日本橋2-13-10	03 (3273) 3 5 5 1 日 石
東洋国際石油株式会社	(104) 中央区八丁堀3-3-5	03 (3552) 8 1 5 1 コ ス モ
東和産業株式会社	(174) 板橋区坂下3-29-11	03 (3968) 3 1 0 1 三 共 油 化
中西瀝青株式会社	(103) 中央区八重洲1-2-1	03 (3272) 3 4 7 1 日 石
株式会社 南部商会	(100) 千代田区丸の内3-4-2	03 (3213) 5 8 7 1 日 石
日石丸紅株式会社	(104) 中央区築地5-4-14	03 (3541) 4 0 1 5 日 石
日東商事株式会社	(170) 豊島区巢鴨4-22-23	03 (3915) 7 1 5 1 昭和シェル
日東石油株式会社	(104) 中央区新川2-3-11	03 (3551) 6 1 0 1 昭和シェル
パシフィック石油商事株式会社	(103) 中央区日本橋蛸殻町1-17-2	03 (3661) 4 9 5 1 モービル
富士興産アスファルト株式会社	(100) 千代田区永田町2-4-3	03 (3580) 5 2 1 1 富 士 興
富士鉦油株式会社	(105) 港区新橋4-26-5	03 (3432) 2 8 9 1 コ ス モ
富士石油販売株式会社	(103) 中央区日本橋2-13-12	03 (3274) 2 0 6 1 日 鉦 共 石

社団法人 日本アスファルト協会 会員

社 名	住 所	電 話
富士油業株式会社東京支店	(106) 港区西麻布1-8-7	03(3478) 3501 富士 興
丸紅エネルギー株式会社	(101) 千代田区神田錦町3-7-1	03(3293) 4111 モービル
三井石油株式会社	(101) 千代田区神田駿河台4-3	03(3293) 7111 極東石
ユニ石油株式会社	(101) 千代田区神田東紺屋町30	03(3256) 3441 昭和シェル
菱東商事株式会社	(101) 千代田区神田和泉町1-13-1	03(5687) 1281 三石
菱油販売株式会社	(160) 新宿区西新宿1-20-2	03(3345) 8205 三石
瀝青販売株式会社	(103) 中央区日本橋2-16-3	03(3271) 7691 出光
● 中 部		
コスモアスファルト(株)名古屋支店	(460) 名古屋市中区錦2-14-21	052(223) 0711 コスモ
株式会社 澤田 商 行	(454) 名古屋市中川区富川町1-1	052(353) 5111 コスモ
三徳商事株式会社静岡支店	(420) 静岡市紺屋町11-12	0542(55) 2588 昭和シェル
三徳商事株式会社 名古屋支店	(453) 名古屋市中村区則武1-10-6	052(452) 2781 昭和シェル
株式会社 三 油 商 会	(460) 名古屋市中区丸の内2-1-5	052(231) 7721 コスモ
静岡鉱油株式会社	(424) 清水市袖師町1575	0543(66) 1195 モービル
新東亜交易株式会社名古屋支店	(450) 名古屋市中村区名駅3-28-12	052(561) 3514 富士 興
竹中産業株式会社 福井営業所	(910) 福井市大手2-4-26	0766(22) 1565 昭和シェル
株式会社 田中石油店	(910) 福井市毛矢2-9-1	0776(35) 1721 昭和シェル
株式会社トアス名古屋営業所	(450) 名古屋市中村区名駅4-2-12	052(581) 3585 日鉱共石
富安産業株式会社	(939) 富山市若竹町2-121	0764(29) 2298 昭和シェル
中西瀝青株式会社名古屋営業所	(462) 名古屋市中区錦町1-20-6	052(211) 5011 日石
松村物産株式会社	(920) 金沢市広岡2-1-27	0762(21) 6121 三石
丸福石油産業株式会社	(933) 高岡市美幸町2-1-28	0766(22) 2860 昭和シェル
三谷商事株式会社	(910) 福井市豊島1-3-1	0776(20) 3134 モービル
● 近 畿		
赤馬アスファルト工業株式会社	(531) 大阪市北区中津3-10-4	06(374) 2271 モービル
飯野産業株式会社 神戸営業所	(650) 神戸市中央区海岸通り8	078(333) 2810 日鉱共石
大阪アスファルト株式会社	(531) 大阪市北区中津1-11-11	06(372) 0031 出光
木曾通産株式会社大阪支店	(530) 大阪市北区西天満3-4-5	06(364) 7212 コスモ
共和産業株式会社	(700) 岡山市富田町2-10-4	0862(33) 1500 日鉱共石
コスモアスファルト(株)大阪支店	(550) 大阪市西区西本町2-5-28	06(538) 2731 コスモ
コスモアスファルト(株)広島支店	(730) 広島市田中町5-9	0822(44) 6262 コスモ
三徳商事株式会社	(532) 大阪市淀川区新高4-1-3	06(394) 1551 昭和シェル
昭和瀝青工業株式会社	(670) 姫路市北条口3-51	0792(77) 5001 日鉱共石
信和興業株式会社	(700) 岡山市西古松363-4	0862(41) 3691 三石
スーパーストロングインターナショナル(株)	(532) 大阪市淀川区西中島2-11-30	06(303) 5510 昭和シェル
正興産業株式会社	(650) 神戸市中央区海岸通り6	078(322) 3301 三石
中国富士アスファルト株式会社	(711) 倉敷市児島味野浜の宮4051-12	0864(73) 0350 富士 興
千代田瀝青株式会社	(530) 大阪市北区東天満2-8-8	06(358) 5531 三石
株式会社 ナカムラ	(670) 姫路市国府寺町72	0792(85) 2551 日鉱共石
中西瀝青株式会社 大阪営業所	(530) 大阪市北区西天満3-11-17	06(316) 0312 日石
平井商事株式会社	(542) 大阪市中央区東心斎橋筋1-3-11	06(252) 5856 富士 興
富士アスファルト販売株式会社	(550) 大阪市西区京町堀2-3-19	06(441) 5195 富士 興
富士商株式会社	(756) 小野田市稲荷町6539	0836(83) 3210 昭和シェル
平和石油株式会社	(530) 大阪市北区中之島3-6-32	06(443) 2771 昭和シェル

社団法人 日本アスファルト協会 会員

社名	住所	電話
株式会社 松宮物産	(522) 彦根市幸町32	0749 (23) 1 6 0 8 昭和シェル
丸和鉱油株式会社	(532) 大阪市淀川区塚本2-14-17	06 (301) 8 0 7 3 コスモ
横田瀝青興業株式会社	(672) 姫路市飾磨区南細江995	0792 (33) 0 5 5 5 日鉱共石
株式会社 菱芳礦産	(671-11) 姫路市広畑区西夢前台7-140	0792 (39) 1 3 4 4 日鉱共石
● 四国・九州		
伊藤忠燃料株式会社 九州支社	(812) 福岡市博多区博多駅前3-2-8	092 (471) 3 8 5 1 日鉱共石
今別府産業株式会社	(890) 鹿児島市新栄町15-7	0992 (56) 4 1 1 1 日鉱共石
大分九石販売株式会社	(870) 大分市中央町1-1-3	0975 (34) 0 4 6 8 九石
株式会社 カンダ	(892) 鹿児島市住吉町1-3	0992 (24) 5 1 1 1 昭和シェル
株式会社 九菱	(805) 北九州市八幡東区山王1-17-11	093 (661) 4 8 6 8 三石
コスモアスファルト(株)九州支店	(810) 福岡市中央区鳥飼1-3-52	092 (771) 7 4 3 6 コスモ
サンヨウ株式会社	(815) 福岡市南区玉川町4-30	092 (541) 7 6 1 5 富士興
三協商事株式会社	(770) 徳島市万代町5-8	0886 (53) 5 1 3 1 富士興
株式会社 トーアス高松営業所	(760) 高松市亀井町8-11	0878 (37) 1 6 4 5 日鉱共石
中西瀝青株式会社 福岡出張所	(810) 福岡市中央区天神4-1-18	092 (771) 6 8 8 1 日石
株式会社 南部商会福岡営業所	(810) 福岡市中央区天神3-4-8	092 (721) 4 8 3 8 日石
西岡商事株式会社	(764) 仲多度郡多度津町家中3-1	0877 (33) 1 0 0 1 三石
畑砒油株式会社	(804) 北九州市戸畑区牧山新町1-40	093 (871) 3 6 2 5 コスモ
平和石油株式会社高松支店	(760) 高松市番町5-6-26	0878 (31) 7 2 5 5 昭和シェル
丸菱株式会社	(812) 福岡市博多区博多駅前4-3-22	092 (431) 7 5 6 1 昭和シェル

編集顧問

多田宏行  
藤井治芳  
松野三朗

編集委員

委員長：河野 宏	副委員長：真柴和昌
秋葉國造	菅野善朗 辻 保人 山田 実
阿部忠行	栗谷川裕造 鶴窪廣洋
荒井孝雄	小島逸平 野村敏明
安崎 裕	児玉充生 姫野賢治
飯島 尚	田井文夫 室賀五郎

アスファルト 第175号

平成5年4月発行

社団法人 日本アスファルト協会

〒105 東京都港区虎ノ門2-6-7 TEL 03-3502-3956

本誌広告一手取扱 株式会社 廣業社

〒104 東京都中央区銀座8-2-9 TEL 03-3571-0997(代)

印刷所 アサヒビジネス株式会社

〒107 東京都港区赤坂1-9-13 TEL 03-5563-0123(代)

**ASPHALT**

Vol. 35 No. 175 APRIL 1993

Published by **THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION**