

**委員会報告**  
**COMMITTEE**  
**REPORT**

## 【委員会報告】

## 舗装機能の評価技術の現状と将来

TODAY AND FUTURE ON EVALUATION TECHNICS OF  
PAVEMENT FUNCTIONS

土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する研究小委員会

*Committee on Evaluation of Pavement Functions*

## 1. ま え が き

わが国の道路は、今日では110万kmにも及ぶ全国的な道路網を形成するに至り、計画段階にある一部の高規格幹線道路等を除き、ほぼ新設の時代から維持、修繕の時代へと移行しつつあると言えよう。このように、面的にも大きな広がりを持つ道路は、機能的にも旅客輸送や貨物輸送を担う本来の交通路としての役割だけではなく、都市構造を形作る骨格としての機能、地下埋設物や公共施設などの設置場所としての機能、あるいは、都市、地域の景観を形成する機能など多大な価値を有しており、今後はこれをますます高度に機能化し、利用する技術の開発が必要になるものと考えられる。

一方、1951年にゼロの状態から再出発したわが国の航空輸送は、旅客数、貨物量ともに年々増加の一途をたどっており、各地に着々と空港整備が進められてきたが、空港の建設には、平坦でかつ広大な土地を必要とし、都心に近いほど便利で望ましいという利用者のニーズと、宅地から遠いほど静かで望ましいという周辺住民の相反する要望を受けて、近年は都市近郊の海上や山岳地帯などの特殊な地盤条件をもった地域に用地を求めざるを得ないことが多くなっている。

このような状況を踏まえて、舗装の機能を高度に利用するためのノウハウを確立するため、特に舗装およびそれを支える地盤の利用、評価に焦点をあて、1989年、「土構造物および基礎委員会」の中に本小委員会を、設置された。

本研究委員会で扱うべきテーマは非常に幅広く、到底すべてを解決することは困難であるが、舗装が本来具備すべき機能にはどのようなものがあるかを明らかにし、それらを実評価するにはどのような道具を用いてどのような理論に基づいて行うべきかという非常に根本的な問題を調査した。

具体的な研究内容としては、本来、舗装機能の評価は構造的な健全度と、その表面が利用者に提供し得るサービス性能という2つの側面から捉える必要があると考えられるため、このような問題を理論的に大きく以下のよ

うに分けて、それぞれに対応したワーキンググループを設けて活動を行った。

- ① 舗装機能評価試験機の現状についての調査研究
- ② 舗装構造の力学理論についての研究
- ③ 舗装表面の評価方法についての研究

また、1992年5月には、成果の一部を紹介し、活発な意見交換を行うため、「舗装機能の評価法」と題するシンポジウムを開き、非常に多数の参加者を得た。

本報告は、このシンポジウムにおいて発表された多くの調査研究成果、応用実例を中心とし、国内外における舗装機能評価方法の現状と将来の展望を述べることを目的とする。

## 2. 舗装機能評価の考え方

一般に、評価とは、計画者が問題解決のための意志決定を行う際に問題を明確化するために行われる行為であり、計画目標に応じた対象の評価尺度の作成を伴うのが一般的である。ここでは、路面の基本的特性による評価体系を考察し、評価要因相互の関連性について紹介するとともに、システム手法に基づく総合的評価方法の一般的概念について述べる。

## (1) 舗装の路面特性と分類

舗装の路面特性は、舗装の維持や車両の消耗のみならず交通安全、乗り心地、環境保護やエネルギーの節約等を含めた評価のための決定要因に直接影響を与えるもので、時の経過と共に質的に変化をするものである。このような性質を有する路面特性を体系的に把握する方法について Hiersche<sup>1)</sup> および PIARC<sup>2)</sup> の提案に基づき考察することにする。

## a) Hiersche による分類

Hiersche は、路面特性は、路面が本来有する「基本的特性」とそれから「派生する特性」とに区別することができるとしている。基本的特性は、舗装された路面が本質的に関係する性質を表し、①平坦性、②ラフネスおよびテクスチュア、③輝度、さらに場合によっては、④幾何形状、⑤舗装表面の材料物性からなる。これらの路面の本質に關係する性質は、異質の要素を含んでいるた

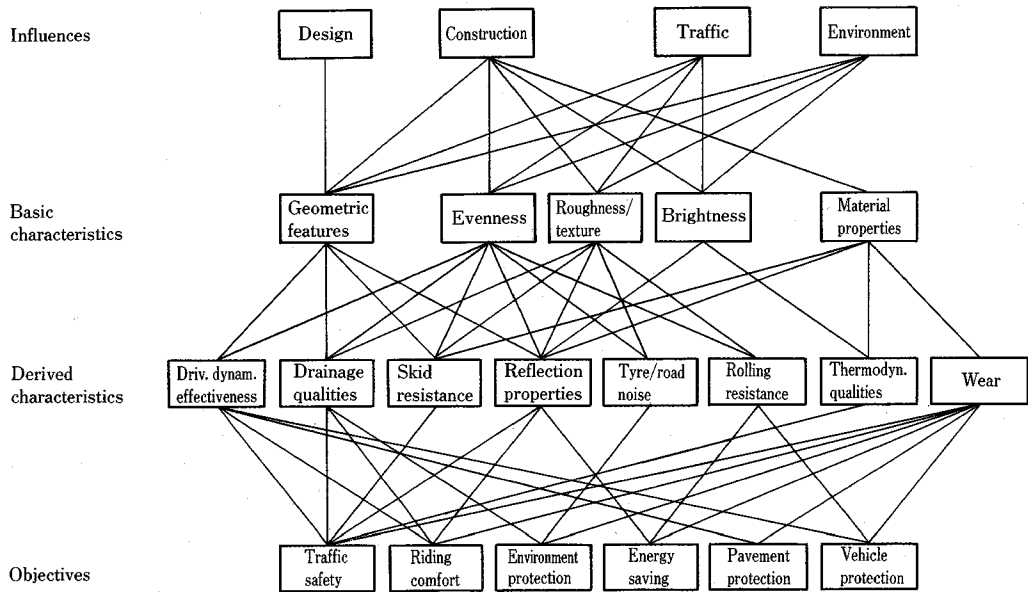


図-1 舗装路面の最適化のための概念図

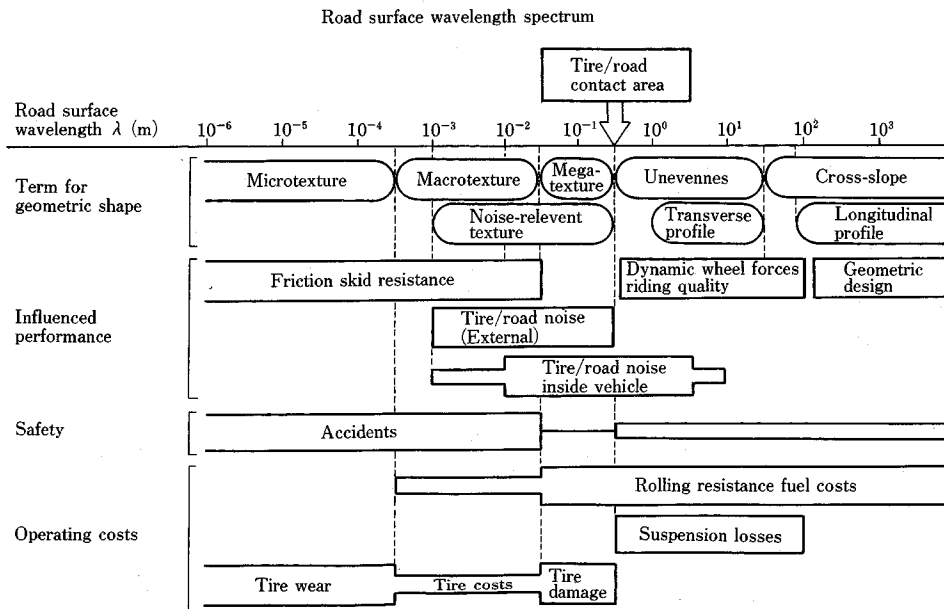


図-2 波状特性による路面の分類図<sup>2)</sup>

め、このままでは路面の最適化のための重み付けは困難であるが、「平坦性」と「ラフネスおよびテクスチュア」との関係は、「平坦性」と「輝度」との関係よりも理解しやすく、互いに密接と思われる。

また、路面により派生して起こる種々の特性は、気象状況、日照状況(照明状況)およびタイヤ、サスペンションブリング、ライト、速度などの車両状況に関連する舗装表面の特性があり、具体的には、①運転操作への動

的影響、②排水性、③すべり抵抗、④光反射特性、⑤タイヤ・路面間騒音、⑥転がり抵抗、⑦熱力学特性、⑧摩擦などがあげられる。このうち、①は、車の3次元的な挙動を含む「運転者—路面システム」を意識した舗装面がドライバーの運転操作に及ぼす動的効果に関連する。

これらの特性分類より、特性間の相関関係に着目しながら路面の最適化対象および道路設計、交通、環境などへの影響について整理したものを図-1に示す。

## b) PIARCによる分類

一方、PIARCでは、主として路面の幾何形状により路面の特性を分類し、他の要因への影響評価に用いている。図-2は、PIARCで定義された路面特性の対象領域であるが、図では「マイクロテクスチュア」、「マクロテクスチュア」、「メガテクスチュア」および「ラフネス」の概ね4区分で分類している。これらは、いずれも路面が有する波状特性の波長により区分しているものである。図においては、これらの区分を基に、路面が誘因となって発生する車両もしくは乗員の動的応答特性に関連する尺度である「乗り心地」、「安全性」、「騒音」や「オペレーティングコスト」などとの関連性について示している。

質の高い道路の整備と運用のための路面評価には、単に舗装分野に留まらず、交通、自動車、環境等を含めた広い幾多の要因を考慮することが今後不可欠であり、多角的総合的側面から調和のとれた方法を選択しなくてはならない。このようなことから今日では、総合的に路面特性全般を最適化することに主眼点がおかれるようになってきている。

## c) システム手法による路面の評価

これまでに述べた路面と車の相互作用問題は、従来の現象分析主体であったものから、それらの結果を基に総合的評価を行うといった方向に現在主眼点がおかれるようになってきている。この総合的評価を行うには、交通安全対策などの道路交通問題の解決のための理念としてしばしば引用される「人-車-道路系」のような幾つかの関連系統や、因子相互の関連を意識したいわゆるシステム思考が必要である。

システム手法とは、Haasら<sup>3)</sup>が述べているように「新しいシステムを効果的に計画、設計、適用するために、さらには現在運用されているシステムの知識の再構築、または運用のモデル化のために、今日までの知識を集大成したもの」であり、対象とする問題解決に関係のある全ての因子をまとめて構造化する必要がある。

近年、各国では路面特性の総合的評価について関心が向けられるようになってきた。米国においては、路面の凹凸が道路の利用者費用や乗り心地に与える影響について精力的に研究が進められ、シンポジウムも数多く開かれるようになってきているが<sup>4),5)</sup>、その中においても総合的評価問題が取り上げられ、車のオペレーティングコストと道路設計、路面状況との関係を扱うもの<sup>6)</sup>、道路のデータバンクより提供される路面の情報システムと舗装のマネジメントシステムとを路面の測定手法と関連付けて処理したりするもの<sup>7)</sup>、他にも路面の最適化に関するもの<sup>8)</sup>などが見受けられる。

英国においても、タイヤと路面間について安全性・騒音・転がり抵抗・乗り心地・排水性面から総合的な解析

表-1 システムアプローチに必要な要因と要素

Factor	Component				
	Road	Tire	Wheel	Suspension	Brakes
Safety	×	×	×	×	×
Economy	×	×	×		×
Comfort	×	×		×	
Noise	×	×			
Load support	×	×		×	

が行われてきている<sup>9)</sup>。表-1は、路面およびタイヤの最適化のための「人-車-道路系」に関するシステムアプローチに必要な、要因と要素について述べたものである。

わが国においても、路面のサービス性能、乗り心地、車の振動特性を総合的に考察しながら路面の凹凸の評価を行う試みがなされている<sup>10)</sup>。

総合的評価方法には、たとえば、快適性と環境保護などのように質的に異なる評価要因をどのように重みづけをして比較をするかなど、解決されるべき問題点があり、今後は、車の運動や路面のサービス性との相関が容易に把握できる評価指標の利用および開発、さらには評価に先立つところの路面の把握方法について新しい視点に立った試みが必要とされよう。

## (2) 舗装の構造評価方法の概念

## a) 舗装の構造評価の目的

前節で述べた路面の評価方法が、走行の快適性、ユーザーコスト、安全性等ユーザーの立場に立った評価であるのに対し、構造評価は舗装の管理者の立場に立って行われるものである。言い換えれば、路面評価は舗装の表面に表れている現在の状態を評価するものであるのに対し、構造評価は、舗装が将来どのように変化して行くのかを予測するために把握されるものである。Ullidtzは、ひびわれやバッチングの審美的影響を除けば、ユーザーが舗装をどのように評価するかということに関して、構造評価は何の役にも立たない、と言っている。しかし、構造評価は舗装の補修時期、補修区間、補修工法の決定になくてはならないものであり、また新設舗装の設計条件を定める場合にも、構造評価の結果が反映されるのである。

構造的な破壊は路面のひび割れや、平坦性の悪化として現れてくる。わだち掘れも構造的欠陥が原因で生じることがある。構造評価とは舗装の支持力を評価することである。支持力 (bearing capacity) とは、Ullidtzによれば、「舗装が機能的にあるいは構造的に許容できないレベルの破壊に達するまでに支えることのできる規準の大きさの輪荷重通過回数」であり、舗装の構造的破壊とは Yoder と Witczak によれば、「舗装の崩壊、あるいは一つ以上の層が路面の荷重を支えられなくなるまで弱体

化すること」と定義されている。従って、舗装があと何年もつかを評価すること、すなわち余寿命を予測することが構造評価の重要な役割の一つである。

#### b) 構造評価の実際

構造評価は、新設の舗装に対しては構造設計が過大でも過小でもなく、適切であったかどうかを知るために行われる。供用中は健全度評価とも称して、舗装を構成している層の構造的強さが十分であるか否かを調査し、余寿命を評価する目的で構造評価が行われる。現在、舗装の組織的な健全度調査は新道路研究計画（SHRP：Strategic Highway Research Program）の一環として、建設省土木研究所により全国28箇所の路線で実施されている。

すでに壊れてしまった舗装に対して、何が原因で壊れたのか、どのような補修工法を選択すればよいのかを調査する目的の構造評価は、これまでも実施されている。ただし、舗装を掘削して、路床、路盤材のCBR試験を行うのがほとんどである。掘削による構造評価は、時間とコストがかかるためサンプル数を多くできず、結果の信頼性が低い。そのために、掘削調査は大規模な打換えを行うとき以外は実施されない。通常は路面の破壊状態を目視によって評価し、補修工法の選定は経験者の技術的判断に頼っているのが現状である。

本格的な構造評価は、非破壊試験装置の開発、マイクロコンピュータの大衆化、および、使いやすい多層弾性解析プログラムの普及の3つが達成されて初めて可能になるものである。これらの実現によって迅速で、ピッチの細かい構造評価ができるようになり、その結果を構造設計に活かすことができるようになったのである。また、地中レーダやボアホールカメラによる舗装厚の測定は、舗装構造の変化点をチェックしたり、後述のFWDたわみからの逆解析弾性係数の精度を向上させるのに大変有効である。舗装の現場における定期的な非破壊試験が可能になって初めて、舗装マネジメントシステム、いわゆるPMSに構造評価データを組み込むことができるようになるのである。

舗装の構造評価に用いられる装置については後に述べるが、これからデータが蓄積されて、各種舗装材料の弾性係数、ポアソン比、限界ひずみ、疲労寿命等の力学的性質が定められていくことになる。舗装の理論設計法が現実利用できるようになるためには、舗装構造モデルが正しいこと、入力条件が実際と合っていること、破壊規準が妥当なものであることが必要であるが、これらの条件は正しい構造評価が保証されて初めて可能になるものである。

舗装の機能評価は、病状を訴えることのできない患者に対する健康診断に例えることができる<sup>13)</sup>。すなわち、路面性状調査は皮膚科に、FWDは打診に、弾性波探査

は聴診に、地中レーダはCTスキャンに、ボアホールカメラは内視鏡に、データバンクはカルテにそれぞれ対応する。このように考えると、構造評価は内科的検診に例えられ、大規模な打換えは外科手術に例えることができる。なかでも、定期的に行う追跡調査は人間ドックに相当し、病状が悪化する以前に患部を把握し、治療を行うことができれば、舗装ライフサイクルコストも最小に抑えることが可能になるであろう。

#### c) これからの構造評価

構造評価が正しく実施できても、舗装の余寿命予測は容易ではない。輪荷重の通過回数、輪荷重の大きさの分布、輪荷重の通過間隔（レストピリオド）等を正確に把握するのが困難で、室内疲労試験結果との対応がはっきりしないからである。しかし、動荷重測定装置が開発されており、今後輪荷重が正確に測定できるようになれば、余寿命予測の精度も向上するであろう。

構造評価の結果は、理論設計法に適用されて、維持修繕工法の設計に使用され、また、合理的な新設計法の開発にも反映されるべきものであるが、そこにはまだ多くの解決すべき問題が残されている<sup>14)</sup>。すなわち、舗装材料の弾性係数の大きさはどのくらいか、破壊規準はどのように設定するか、交通条件はどのように見積もるのか、疲労曲線は正しいのか等に対する解答を与えるためには、今少し研究の蓄積が必要である。

しかし、理論設計法は、新材料、新工法の評価、破損の原因究明、舗装の余寿命予測、国際的な設計の比較等が可能であるために、今後、研究面、実際面の双方において検討される機会が増えるものと思われる。理論設計法と構造評価とは切り離して考えることはできないものであり、構造評価が検討される機会も多くなるであろう。これからも、構造評価のための様々なハードウェア、ソフトウェアが開発され、評価の信頼度は向上するものと思われる。特に、マイクロコンピュータの演算速度の高速化およびアクセス可能な内部記憶容量の増加の進歩が著しく、弾性係数の逆解析の効率および信頼度の向上がますます改善されていくことは間違いがない。

### 3. 舗装機能評価手法

#### (1) 概要

舗装は路面を通して、利用者にサービスを提供するものである。そのサービスの内容は、①平坦性、②すべり抵抗性、③排水性、④支持力、⑤美観、⑥振動、騒音、⑦その他に分類される。この中で、振動、騒音などは、沿道住民へ及ぼす影響から、舗装の負のサービスと考えられる。道路および空港の機能によって舗装に要求されるサービスの内容とそのレベルは当然異なってくる。すなわち、高速道路、滑走路などにおいてはより高い平坦性とすべり抵抗性が要求される。ヤードなどにおいて

は、特殊車両の走行に対して高い支持力が要求される。また、商店街やモールなどにおいては、舗装に美しさが要求され、このため、色彩、テクスチャ、模様などデザインに優れている素材の利用が盛んになってきている。これらサービスの善し悪しはサービスビリティ（サービス性能）と呼ばれているが、ここではそれを舗装機能と表現している。

(2) 交通条件の評価方法

舗装の設計を行うにあたっては、路床の支持力と負荷される交通の評価が必要である。このうち、交通条件の評価は、舗装に直接負荷される交通荷重および交通量だけではなく、交通の速度、交通の走行位置分布に対する評価も重要である。

交通量の測定方法は、研究分野によって異なるが、舗装の設計に関係の深い測定方法について整理をすると、以下ようになる。

交通量の評価方法

- 人手による方法<sup>11), 12)</sup>
  - 数取器方式
  - チェックマーク方式
- 自動交通量測定機(車両感知器)による方法
  - 超音波方式<sup>13)</sup>
  - レーダ方式
  - 電磁コイル(ループコイル)方式
- 全国道路交通情勢調査(道路交通ライセンス)<sup>14)</sup>

また、交通荷重は大きく輪荷重と接地圧に分けられ、このうち前者の測定方法は、静的と動的の2種類の測定方法に大別される。静的な測定方法は、静止した交通の荷重を測定するものであり、また動的な測定方法は、走行している交通の荷重を測定するもの、いわゆる WIM (Weigh-In-Motion) といわれるものである<sup>15), 16)</sup>。これらを整理すると、以下ようになる。

交通荷重の評価方法

- 輪荷重の測定方法
  - 静的な測定方法
    - weigh-bridge
    - ポータブル軸重計
  - 動的な測定方法(WIM)<sup>17), 18)</sup>
    - 埋設式軸重計
      - プラットホーム
      - ひずみケージ式プレート
      - 圧電ケーブル
    - ポータブル軸重計
      - 静電容量パッド
      - 油圧パッド

- ひずみケージ式プレート
  - プラットホーム
  - 道路橋を利用した測定装置
  - オンボード式の荷重測定装置
- 接地圧の測定方法

車輪の走行分布は、道路では横断方向分布が、また空港舗装では横断方向分布と縦断方向分布の両者が舗装の評価を行う場合に問題になる。

道路での測定は、横断歩道橋のような道路中心線に対して視界の良い撮影場所および道路の測定横断面を選定して、8mm または 16mm のメモモーションカメラ、ビデオカメラにより横断方向の車輪の走行分布を撮影することにより行われる。走行分布は、室内において撮影されたフィルムよりデジタイジングすることにより解析されるが、解析に長時間を要する。この欠点を補うため、加圧導電ゴムを用いた自動測定装置も開発されており<sup>19), 20)</sup>、現在フィールドにおいて実用化のための実験が続けられている。一方、空港での航空機車輪の離着陸時の横断方向の走行位置分布は、滑走開始時、滑走中、離陸時、および、着陸時、減速時、減速終了時に分けて測定が行われる<sup>21)</sup>が、測定は、滑走路中心線上の滑走路端部から少し離れた視界のよい位置において、望遠レンズを装着したカメラなどにより写真撮影し、撮影したフィルムを用いて、デジタイジングすることにより解析される。縦断方向の走行位置分布は、管制塔などの高所より、滑走路灯、滑走路距離灯、進入角指示灯などを目印として行われる。

(3) 舗装構造の評価方法

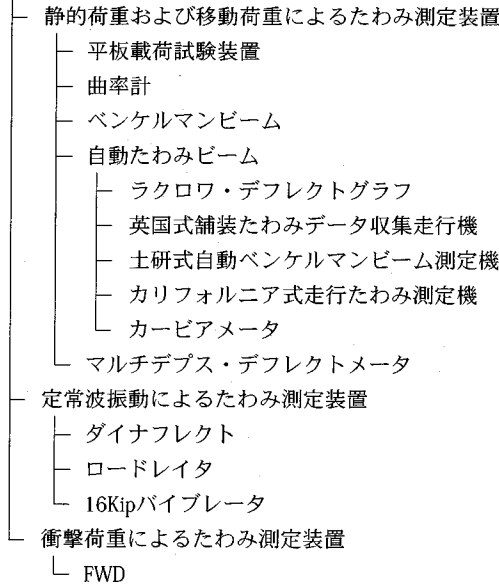
舗装が、平坦ですべりにくいという本来の機能を発揮できるか否かを調べるため、その舗装が構造的にどの程度健全であるかを測定する必要があるが、その方法として、舗装を開削して内部を調べる破壊試験法と、路面に外力を加えた時のたわみ量に着目したたわみ量測定法、路面を伝播する波動の特性に着目した表面波測定、路面上を高速で移動する地中レーダによって舗装厚さを調べる舗装構成測定等の非破壊試験法とがある。

a) たわみ量測定装置

たわみ測定の歴史は、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。その方法は、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た。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

すると以下ようになる<sup>22)~53)</sup>。

舗装表面たわみ測定装置



歴史的には、平板載荷試験装置やベンケルマンビームに代表されるように、静的または低速移動荷重によって生ずるたわみを測定することが一般的であった。特に、ベンケルマンビームはAASHO 道路試験が行われた1955年に開発されてきて以来、用途が広く単純で安価であるという長所のため、舗装の研究、舗装評価、オーバーレイ設計などに日本を始め世界各国の道路関係者に広く用いられてきた。しかし、この装置は、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に起因する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評価に値する。

しかし、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、弾性係数の逆解析に近い試みが行われるようになると、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50 kN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、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市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トが多く使用されてきたが、SHRP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D 4694「重錘落下式衝撃荷重装置によるたわみ測定方法」およびD 4695「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。

FWDは多くの優れた特徴を持つが、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ろう。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る。

b) 表面波測定装置

地質構造を非破壊で調べる方法に、電波、放射能、磁気、音波、弾性波(振動)などを使って調査する物理探査法がある。海洋では音波探査が、地上では弾性波による探査が主流である。弾性波には、粗密波(P波)、せん断波(S波)、表面波(レイリー波:R波)等の種類があり、いずれも媒体の弾性係数、ポアソン比、密度によって変化する。このうちP波の伝播速度が最も高く、R波はS波の90%程度の速度であり、R波はP波やS波に比べ減衰が小さくより遠方まで伝わる事が知られている。さらに、波長によって伝えられる情報の深度が決まる。つまり短波長は浅部を、長波長は深部の情報を持っている。

この特性は舗装構造の評価にも応用可能で、路面上に設置した起振機により種々の周波数を発振させて、その波動の伝播速度を求め、種々の分析を行って構造評価を行うことが試みられている<sup>54)~57)</sup>。代表的なものは、アメリカ合衆国テキサス大学でこの数年間進められている表面波スペクトル解析(SASW)法<sup>54)</sup>で、表面波のス

ベクトル解析から分散曲線を求め、逆解析によって舗装を構成する各層の平均弾性係数と層厚を求める方法である。現状では、1地点の測定に長い時間を必要とするという問題に対し、100m程度までの深さでの探査能力があるという利点を有するが、適用例が少なく、実用化には今後の研究が必要と思われる。

c) 舗装構成測定装置

上で述べたような舗装構成各層の弾性係数を正確に推定するためには、各層の厚さは既知であることが極めて望ましい。従来は、舗装を開削したり、大口径のコアカッターでコアを抜いて各層の厚さを調べるのが一般的であったが、作業効率が低く、広域にまたがる調査が困難である上に、舗装を基本的に破壊してしまうという問題を内包していた。近年、これらの問題点を克服すべく、音波や電磁波を用いて非破壊で舗装厚を調べる方法が開発され、実用レベルに達しつつある。

音波法<sup>58),63)</sup>は、発振体から発振される音波パルスを地中に入射させ、舗装境界からの反射波を捉えて舗装厚を知る方法で、精度は高いが、発振機と舗装表面との間に空気層があってはならないため、非接触で移動しながらの測定はできない。これに対して、地中レーダー法<sup>59)-62)</sup>は、パルス状の電磁波を間欠的にアンテナから放射し、音波法と同様に測定するが、非接触での測定が可能な反面、電磁波速度が物質の比誘電率によって異なるため、何らかのキャリブレーションを行わないと絶対的な意味での厚さを知ることはできない。さらに、ポアホールカメラを用いて舗装に直径40~50mmの孔を開け、孔の壁面の写真を撮影することによって非常に正確な舗装厚を調べる方法も開発されている<sup>61),62)</sup>。孔の径が小さく、舗装をほとんど痛めないため、非破壊試験の1つに分類し得る。

(4) 路面性状の測定方法

舗装路面の損傷には以下に示すようなものがある。

舗装路面の損傷

- ひびわれ
  - 亀甲状ひびわれ
  - 線状ひびわれ
  - ヘアークラック
- 変形
  - わだち掘れ
  - 縦断方向の凹凸
  - コルゲーション
  - 寄り(こぶ)
  - くぼみ
  - フラッシュ
- 摩耗
  - ラベリング

- ポリッシング
  - はがれ(スケーリング)
- 段差
- 崩壊
  - ポットホール
  - はく離
  - 老化
- 目地部の破損
- 座屈
- その他
  - きず
  - 表面ぶくれ
  - 凍上
  - 噴泥

これらの損傷を調査するための装置が各国において開発されている<sup>3),64)-67)</sup>。わが国では、路面の損傷はひびわれ、わだち掘れ、平坦性の3大要素により表現され、そのための自動化された調査装置も世界に先がけて開発され実用に供されている。一方欧米においては損傷の他に乗り心地の指標であるラフネスの調査が多くの機関で実施されており、そのための装置も開発されている。

路面性状調査に用いる測定装置には、ひびわれのような路面の損傷画像を記録する路面損傷の記録装置、横断形状を測定する横断形状測定装置、縦断形状を測定する縦断形状測定装置などがある。これらを分類すると、以下のようなになる。

路面性状測定装置

- 路面損傷の記録装置
  - 自動測定装置
    - 面撮影方式
    - 線撮影方式
    - 点撮影方式
  - 目視測定装置
- 路面横断形状測定装置
  - 車載測定装置
    - 光切断方式
    - フライングスポット方式
    - 多点変位計測方式
  - 非車載測定装置
- 路面縦断形状測定装置
  - 車載測定装置
    - 1点測定方式
    - 2点測定方式
    - 3点測定方式
  - 非車載測定装置



一方、道路を乗り心地の観点より評価する場合には、前述の縦断形状測定装置による方法のほか、直接にラフネスを測定する装置による方法がある。本来、乗り心地は道路の縦断線形、車両の振動特性、車両の速度、乗客の振動感度特性と密接な関係があると言われている。このことから、縦断形状測定装置による方法はこれらの乗り心地に影響を及ぼす要因を数値計算処理の過程でパラメータとして与え、乗り心地を計算する方法である。一例として、クォーターカーシミュレーション (1/4 Car Simulation) と呼ばれる数値計算法がある。一方、ラフネス測定装置は道路の縦断線形を除く乗り心地に影響する要因を、測定装置の定数 (固定値) あるいは測定条件値として取り扱う測定装置である。

ラフネス測定装置として広く普及している装置は BPR Roughometer に代表されるトレーラータイプの装置である。本装置は具体例で示すように乗用車のサスペンション機構を模した装置であり、フレーム上にダッシュポット機構、リーフスプリング機構、変位積算計を備え積算計によりフレームの振動を計測する方式である。この他にも May's Ride Meter の様に乗用車のサスペンションに直接、積算計を装置する方式もある。

#### (5) すべりおよびテクスチャ

車両や航空機は、タイヤ・路面間に摩擦抵抗があることにより、エンジンの動力を路面に伝達して走行できる。この摩擦抵抗は、車両の駆動、走行、制動時を問わず、常時必要であることは言うまでもなく、特に車両運転時の安全性の観点からは重要なものの一つである。たとえば、登坂時、制動時、曲線走行時に十分なすべり摩擦抵抗が確保されなければ事故に結びつきかねない。前二者は車両進行方向と同一方向に作用する縦すべり摩擦抵抗、後者は進行方向と直角方向に作用する横すべり摩擦抵抗として認識されている。1971年の英国の交通事故に関するデータでは、250,000件の人身事故のうち25,000件は湿潤路面が原因とされ、さらにそのうち13,000件はすべり摩擦抵抗の小さいことが原因である。

この路面摩擦に影響する因子としては、タイヤ・舗装といった材料、路面の乾湿・温度、車両の走行速度等がある。タイヤに関しては、その材質、タイヤトレッドが、舗装材料に関しては舗装種別、骨材といったものが挙げられる。また、湿潤路面では、乾燥路面に比べて摩擦抵抗は小さなものとなるばかりではなく、速度の増加につれて減少するとされている。

このすべり摩擦係数の測定方法としては、車両を走行させることによって直接すべり摩擦係数を測定するものと、小型の試験装置により路面の凹凸等を測定するものの2種類がある。前者によれば、舗装を実際に使用する車両やその類似車両によって現実に近い摩擦係数が測定できるという利点がある。これに対して、後者は測定の

容易さから多用されているものの、車両走行時のすべり摩擦抵抗との結び付けが必要とされている。

#### a) すべり

すべり測定装置を分類すると、以下のようになる<sup>68)~72)</sup>。

#### すべり測定装置

##### 実車による装置

- 路面すべり抵抗測定車
- Saab Friction Test (SFT)
- ASTM Skid Trailer
- SCRIM
- $\mu$ メータ

##### 実車によらない装置

- DFテスター
- ポータブルスキッドレジスタンステスター

実車によりすべり摩擦抵抗を測定する場合、すべり抵抗は以下のような指標で定量的に評価される。

- BFC (Braking Force Coefficient) : 車両の直線走行時や制動時にかかわる縦すべり摩擦抵抗を表すもので、タイヤに作用する水平方向ブレーキ力を垂直力で除した値。
- SFC (Sideway Force Coefficient) : 車両の曲線走行時にかかわるすべり摩擦抵抗を表すもので、車両進行方向にある角度をもって回転するタイヤの軸方向水平力を垂直力で除した値。
- SDR (Stopping Distance Ratio) : 湿潤路面での車両の停止距離あるいはそれと乾燥路面での停止距離との比。

舗装のすべり抵抗の管理は試験車による方法が基本である。しかし、試験車による測定は、試験車の台数に限りがあること、測定時の散水等による一般通行車への影響が懸念されること、測定時の編成が大がかりになることなど測定にあたっての制約が多い。また、室内における舗装材料の研究に使用したり、試験施工時の小規模工事においては、それを適用することが不可能または著しく不経済となる。そのような場合には、ポータブルスキッドレジスタンステスターが用いられる例が多い。試験車は定期的かつ連続したすべり抵抗の測定に向いているが、試験車の確保、一般車への影響および測定編成が長大となり、その適用箇所はある程度限定される。また、ポータブルテスターは測定方法が簡便で安価であるため、舗装材料の研究開発には向いているが、この測定値により路面の管理を行うことはできない。

このように、試験車とポータブルテスターには、それぞれ一長一短があり、道路の舗装面の建設および管理にあたっては、それぞれの長所を最大限に発揮するべく配

慮する必要がある。

すべり抵抗係数の評価値(基準)を考えた場合、基準値を保持するための組織、経済性なども考慮しなければならないので、その国あるいは機関の立場・考え方、すべり抵抗値と交通事故との関係についての解釈によって評価値のあり方が異なってくる。また、空港舗装においては、航空機が多国間運航をするため、国際基準を設けることが必要とされる。

#### b) テクスチャ<sup>69), 73), 74)</sup>

路面のテクスチャ(きめ)は、タイヤ・路面間のすべり摩擦に関係することは明らかである。一般にすべりに関係する路面の凹凸は、マイクロテクスチャとマクロテクスチャとに分けて考えられ、波長で0.5mm程度が両者の境界値とみなされている(図-2)。これらが、すべり摩擦係数に及ぼす影響は異なったものであり、前者が滑らかなものであれば摩擦係数は全般的に小さいものとなるのに対し、後者のマクロテクスチャが滑らかであれば高速時のすべり摩擦抵抗が小さいものとなる。高速走行時のすべり摩擦に関しては、コンクリート舗装よりもアスファルト舗装のマクロテクスチャのほうが重要であることが指摘されている。

マクロテクスチャの測定装置としては、砂を用いて路面のきめ深さを測定するサンドパッチ法が一般的なものである。また、マイクロテクスチャ測定装置としては、ステレオフォトグラフィー法などが知られている。このほか、路面のミクロな凹凸を直接測定するものである光学式プロフィロメーターも開発され、商品化されている。

## 4. 路面の評価方法

### (1) はじめに

一般に、舗装の評価はそのパフォーマンスを通じて行われる。パフォーマンスとは、その舗装がある期間にわたり交通に供しうる能力であり、①管理者の主観により主に維持修繕の必要性から定められる「維持管理水準」および②利用者の平均的な主観により主に快適性、安全性の観点から定められる「サービス水準」などの指標によって決定される。その際には、利用者が直接見たり触れたりする路面の性状に対する認識が重要であることは言うまでもない。舗装が有すべき路面性状の水準は、その路面の破損程度に対する管理者の技術的な判断や、路面のサービス水準に対する利用者の主観的な満足度などに基づいて適正に維持されるべきであることは論を俟たない。上記の指標のうち、維持管理水準は、管理者の主観により、主に維持修繕の必要性から見た路面性状の善し悪しで評価されるのに対し、舗装のサービス水準は、利用者の平均的な主観により、主に乗り心地の善し悪しで評価される。このような利用者の主観的な満足度と、路面の客観的な性状とを結び付ける研究が多くなされ、

その結果に基づいて路面性状を表すための指標が提案されてきた。それらのほとんどは、舗装の破損の程度をわだち掘れ深さやひび割れ率などの単純な物理量で代表され、これらが定めれば路面性状も一義的に決定するといった考えに基づいて定式化されている。

管理者が路面を評価する方法を議論するに当たっては、①各々の管理項目をどのように定量化すべきか、また、②これらの管理項目によって最終的に路面性状をどのように定量化すべきかという2つの問題が解決されなければならない。前者は、舗装の破損の程度をどのように評価すべきかという議論であり、方法が確立していさえすれば、ほぼ機械的に定量化をすることが可能である。後者は、このように決められた管理項目によって路面性状を総合的にどのように評価するかという議論であり、管理者によってさまざまな評価指標が提案されている。

一方、利用者から見た場合、舗装に対して、①揺れない、②振動しない、③静かである、④すべらない、⑤ハンドルを取られない、⑥まぶしくない、⑦水はねがない、⑧交通量が多くない、⑨沿道に(人を含めて)危険物が少ないなどの性能を期待しているか考えられるので、このような要因を取り入れた評価方法も必要であろう。

### (2) 路面評価の現状

路面性状の善し悪しについての主観的な評価をすべての道路、空港等について定期的実施するのは実用的でないので、この評価値を客観的な測定値によって表現する工夫が国内外の様々な機関で色々と試みられている。これらの多くの指標は、路面の平坦性、わだち掘れ、ひび割れなどの管理項目によって表現されているが、管理項目の定量化にあたっては測定方法からデータの処理方法まで実に多様な考え方がありうる。これらの項目を用いた舗装評価指標として、安全性、快適性、支持力などのいずれを重視するかによって様々な形式のものが提案され、実用に供されている。

路面性状の総合的な評価方法に着目し、代表的な機関または研究者が採用または提案している舗装の評価方法をまとめると、以下のようになる<sup>75)-79)</sup>。

- AASHO ————— PSI
- 米国アスファルト協会 ——— 11の管理項目
- 米国, Shahinら ————— PCI
- カナダ運輸省 ————— PQI
- カナダ・オンタリオ州 ——— DI
- イギリス・TRRL ————— 11の管理項目
- 世界銀行 ————— IRI
- 道路維持修繕要綱 ————— PSI, 単項目
- 建設省 ————— MCI
- 運輸省 ————— PRI
- 首都高速道路公団 ————— 単項目
- 日大, 阿部 ————— CRD

- 建設省 ————— RCI
- 建設省 ————— PINDEX

このように、管理者の立場では、舗装の耐久性という視点から構造的なパフォーマンスに重点を置いて評価するのに対し、利用者は滑らかな走行性、快適性、安全性といった乗り心地の観点および、車両走行費用等の経済的観点から評価する。

人間にとっての乗り心地と路面の客観的な性状の関係を定量化するための舗装の体系的な調査は、前述のAASHO 道路試験に始まる。AASHO 道路試験の結果提案されたPSIは利用者が評価した路面性状の善し悪しを評価する方法として定着した感があるが、複雑な実路面をわだち掘れ深さ、ひび割れ率、縦断凹凸量といった単純な物理量で代表させ、さらにそれらをとりまとめて指標化したものである。このため、この指標が得られても元の路面の状態が把握しにくいという問題を抱えており、同時にこの指標値には利用者の人間工学的な要因を含んでいない点も指摘されている。

これらのことを改善すべく、最近、走行中の車両の動的特性（車両システム、速度、路面の縦断凹凸の波長と振幅に対応した周波数と加速度など）を踏まえた人間工学的な乗り心地を舗装の評価の中に取り入れようとする研究<sup>82)~92)</sup>や、ファジィ理論を応用した路面の評価も試みられている<sup>93)~95)</sup>。

## 5. 舗装の力学理論

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りうるのである。

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る。多層弾性理論の解は無限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、弾性係数を得るには、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。このような手順を逆解析に対して逆解析 (Backcalculation) と称している。

現在、FWDによるたわみ測定と逆解析手法を組み合わせ、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る。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。

### a) 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、経験によるところ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-2のようになる。

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<sup>96)</sup>。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

表一 舗装の解析理論の沿革

年代	解析理論に関するできごと
1882	Cerrutti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発表
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が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析を公表
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, Velweysosが2層問題の数値解を公表
1961	Nascimento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	Chevron社が多層弾性プログラムCHEV5Lを公表
1967	植下, マイヤホフが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
1990	姫野が多層弾性プログラムELSAを公表

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<sup>97), 98)</sup>。一方、Mindlin<sup>99)</sup>, Melan<sup>100)</sup>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層系への発展されていった。

舗装の構造も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、弾性床土上の平板の理論と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、これが弾性床土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<sup>101)</sup>。その後Hogg<sup>102)</sup>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松村が1931年に厳密解をはじめ公表しており<sup>103)</sup>、続いて1933年にMarguerreが解を得ている<sup>104)</sup>。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<sup>105)</sup>。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<sup>106)</sup>。最近の国内においても木村<sup>107)</sup>、植下<sup>108)</sup>、三浦<sup>109)</sup>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<sup>110)</sup>で公表している。地盤を粘弾性体とした解析<sup>111)</sup>も比較的単純なレオロジーモデルを用いた行われているが、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<sup>112)</sup>、Nascimentoの方法<sup>113)</sup>、上田らの方法<sup>114)</sup>、須田らの方法<sup>115)</sup>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ELSAなどパソコンレベルで作動可能なものまで登場している<sup>116)</sup>。

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<sup>117)</sup>。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<sup>118)</sup>やコンクリート舗装の目地部の解析<sup>119)-121)</sup>、動的応答<sup>122)</sup>や材料非線形を考慮した解析<sup>123)</sup>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。

#### b) 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、実際には、

- 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。

このような相異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①の問題に対しては、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）<sup>124)</sup>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決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

#### a) 逆解析理論の概要

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、いわゆる逆解析によるものである。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。

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、図解法<sup>126)</sup>、等価換算圧法<sup>125), 127)</sup>、あるいは、最小自乗法を用いた最適化法<sup>128)-135)</sup>などの手法により求めることが一般には行われる。

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<sup>135)</sup>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が提案されている<sup>136)</sup>。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り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。

#### b) 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。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。

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。

現在までに得られている、逆解析結果の信頼性についての主要な知見を以下に箇条書きにして述べる<sup>129)</sup>。

- 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。
- 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。
- 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。
- 表層に近い層の推定弾性係数の値は、たわみセンサー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。
- 舗装の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 mmの誤差はほぼたわみ1  $\mu\text{m}$ の誤差に相当する。

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ーの精度も必ずしも十分に満足のものではない。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) 動的解析

舗装に周期的な荷重や衝撃荷重を作用させてその応答から舗装の構造評価を行うといった非破壊検査法が注目されているが、このような試験法による構造評価にあたっては舗装の動的な基本特性を把握しておくことが必要である。特に動的な応答を静的な応答に読み換えて逆解析を行う方法が意味を持つためには、動的な応答と静的な応答との相違を明確にしておかねばならない。

舗装の動的な挙動を取り扱うにあたっては、①荷重の性質（周期的荷重、衝撃的荷重、走行する車両による荷重）、②減衰の影響（舗装材料の粘性、構造的な減衰）、③慣性の影響（舗装材料の質量効果）を考慮に入れた解析を行う必要がある。舗装構造は層構造としてモデル化されるが、層構造地盤の振動あるいは波動の理論は地震工学の分野で発展して来ており、コンピュータと数値計算法の最近の進歩によってそれらの解が容易に得られるようになってきた。FWDのたわみデータの本質をよりよく理解する意味でも、今後この種の解析方法がますます求められるようになるものと思われる<sup>12)</sup>。

#### 6. あとがき

本報告では、信頼性の高い舗装マネジメントシステムを構築するという最終的な研究目標を遂行するための第一歩として、まず問題になる舗装機能の評価法について述べた。すなわち、舗装のサービス性能の考え方を整理し、また、これを時間の関数として捉える場合に必要となる舗装の構造的な評価方法についても、現在までに得られている知見の輪郭を記した積もりである。しかしながら、研究期間もそれほど長くはなく、また、紙面の制約もあって、必ずしも十分なものとは言えないが、現在本小委員会はその組織構成と若干のメンバーを入れ替え、新たな活動を開始しているため、その最終報告に期待して頂きたい。

最後に、本小委員会の研究を遂行するにあたり、様々な形でご協力を頂きました建設省、日産自動車(株)を始めとする諸兄に、感謝の意を表します。

(本報告は、委員全員で作成したセミナーテキスト<sup>23)</sup>に基づき、主に姫野賢治がとりまとめたものである。)

#### 参考文献

- 1) Hiersche, E. : Optimization of Road Surface Characteristics : A Concept for a Research Program in the Federal Republic of Germany, ASTM STP 1031, 1990.
- 2) ASTM : E867-87 Standard Definitions of Terms Relating to Travelled Surface Characteristics, ASTM, Philadelphia, PA, 1987 (1).
- 3) Haas, R. et al : Pavement Management Systems, 1978. (邦訳) 舗装マネジメントシステム, 北海道土木技術会舗装研究委員会, 1989.
- 4) The Symposium on Roughness Methodology, ASTM Committee E-17 on Traveled Surface Characteristics, Bal Harbour Florida, Dec. 1983.
- 5) The First International Symposium on Surface Characteristics. State College, Pennsylvania, June 1988.
- 6) Zaniewski, J.P. and Butler, B.C. : Vehicle Operating Cost Related to Operating Mode, Road Design, and Pavement Condition, ASTM STP 884, 1985.
- 7) Prochazka, M., Kropac, O. et al. : Theoretical Principles, Methods, and Equipment for Pavement Condition Measurements Specific for Road Management Systems, ASTM STP 1031, 1990.
- 8) Descornet, G. : A Criteria for Optimizing Road Surface Characteristics, TRB Record. 1990.
- 9) Williams, A.R. : Tire-Road Interactions-Harmony or Conflict?, Tire Science and Technology, TSTCA, Vol 17, No.1, 1989,
- 10) Kawamura, A., Straube, E. and Beckedahl, H. : Calculation Method for the Developing and Evaluating of Road Roughness,
- 11) (社)交通工学研究会 : 交通工学ハンドブック, 技報堂出版, 1984.
- 12) 堀 監修, 高田・木戸ほか著 : 交通調査マニュアル, 鹿島出版会, 1976.
- 13) 松下電気産業(株), 松下通信工業(株) データ制御事業部 : 交通量測定システム.
- 14) 東京都建設局道路建設部 : 平成2年度全国道路交通情勢調査(道路交通センサス) 交通量調査報告書, 1991.
- 15) 峰岸順一・金井利浩・村山雅人 : 交通荷重の測定とその利用, アスファルト, Vol. 33, No. 165, 1990.
- 16) TRRL : OECD Road Transport Research Programme, Freight Vehicle Overloading and Load Measurement, 1988.
- 17) 菊川滋 : ポータブル車両重量計の適用性に関する実験, 第42回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 1987.
- 18) ASTM E 1318-90 : Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method, ASTM
- 19) 笠原篤 : 舗装における車両の車輪通過位置分布に関する研究, 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 1983.
- 20) 西澤辰男・梶川康男・富田弘之 : 車輪通過位置の自動測定システムについて, 第40回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 1985.
- 21) 梅野修一・八谷好高 : 空港舗装における航空機車輪の通過位置, 第45回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 1990.

- 22) Hudson, W.R., G.E., Elkins, W. Uddin and K.T. Reilley : EVALUATION OF PAVEMENT DEFLECTION MEASURING EQUIPMENT, U.S, Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-TS-87-208, March 1987.
- 23) 笠原篤：非破壊試験としてのたわみ測定装置とたわみデータの利用, アスファルト, Vol. 32, No. 160, pp. 57~67, 1989年.
- 24) 笠原篤・伊藤彦彦：舗装構造の非破壊測定機の現況, 建設の機械化, 第478号, pp. 43~46, 1989年.
- 25) Moore, W.M., J.W., Hall Jr. and D.I. Hanson : State-of-Art on Nondestructive Structural Evaluation of Pavements, the 55th Annual Meeting of the TRB, January 1976.
- 26) Methods of Test to Determine Overlay Requirements by Pavements Deflection Measurements, California Test 356, 1978.
- 27) Dehlin, G.L. : A Simple Instrument for Measuring the Curvature Induced in a Road Surfacing by a Wheel Load, Transactions South Africa Institute of Civil Engineers, 1962.
- 28) 仁瓶義夫・山之口浩：修繕工法の設計上の問題点, 第12回日本道路会議, 特定課題, 1975年.
- 29) 三浦裕二：たわみ曲線によるアスファルト舗装のオーバーレイ厚設計法に関する一考案, 土木学会論文報告書, No. 213, pp. 65~70, 1973年.
- 30) 植下協・吉兼享・坪井英夫・今泉繁良：連続曲率計による舗装の評価, 舗装, Vol. 10, No. 2, pp. 15~20, 1975年.
- 31) The WASHO Road Test, Part 2 : Test Data, Analysis and Findings, HRB Special Report 22, 1955.
- 32) Laboratoire Central des Ponts et Chaussees : Lacroix Deflectographs-Product Bulletin, France.
- 33) 建設省九州地方建設局九州技術事務所：道路維持修繕工事用機械に関する調査試験報告書, 昭和55年3月.
- 34) Norman, P.J., R.A. Snowdon and J.C. Jacobs : Pavement Deflection measurements and their Application to Structural Maintenance and Overlay Design, TRRL Report 571, 1973.
- 35) 高速道路調査会(施工機械文科会)：連続路面たわみ計研究, 1966年3月.
- 36) 磯部金治・吉田六三：自動路面たわみ量測定車, 土木研究所資料, 第606号, 1970年5月.
- 37) Centre Experimental de Recherches et d'Etudes du Batiment et des Travaux Publics : The CEBTP Curviameter Product Bulletin, France.
- 38) Paquet, J. : The CEBTP Curviameter-S New Instrument for Measuring Highway Pavement Deflection, 1977.
- 39) J. Uzan, T. Scullion : Verification of Backcalculation Procedures, Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp.447-458, 1990.
- 40) Scrivner, F.H.G. Swift and W.M. Moore : A New Research Tool for Measuring Pavement Deflection, HRR 129, 1966.
- 41) Geolog, Inc. : Operations Manual for Dynaflect Dynamic Deflection Determination System, Granbury, Texas.
- 42) 阿部洋一・菅野勉・安藤儀幸：舗装の非破壊探査機—グイナフレクト—, 舗装, Vol. 9, No. 8, pp. 16~19, 1974.
- 43) 南雲貞夫・瀬戸薫・山下弘美・佐鳥悦久：道路舗装に関する試験法, 山海堂, pp. 592~593, 1976.
- 44) 運輸省航空局：航空舗装補修要領(案), p. 95, 1984.
- 45) Foundation Mechanics Inc. : Road Rater Operating Manual, El Segundo, California.
- 46) 三井晃：舗装の無破壊調査方法の一例, 舗装, Vol. 9, No. 7, pp. 24~29, 1974.
- 47) (財)高速道路調査会維持補修研究班：路面たわみ測定機(ロードレータ)による実測結果, 舗装, Vol. 9, No. 8, pp. 20~24, 1974.
- 48) Green, J. L. and J.W. Hell : Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure, Nondestructive Vibratory Testing on Airport Pavements Vol. , Federal Aviation Administration, 1975.
- 49) Claessen, A.I.M., C.P. Valkering and R. Ditmarsch : Pavement Evaluation with Falling Weight Deflectometer, AAPT Vol. 45, 1976.
- 50) 笠原篤・丸山輝彦・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, pp. 25~31, 1991年.
- 51) Pavement Consulting Serices, Inc. : Phonix ML 10000 Falling Weight Deflectometer Instruction Manual, College Park, Maryland, 1986.
- 52) KUAB, Konsult and Utreckling AB : KUAB 50 Shop Repair Manual, Rattvik, Sweden.
- 53) Dynatest Consulting, Inc. : Dynatest 8000 FWD Test System Owner Manual, Part 1 and 2, Ojai, California.
- 54) Mazarian, S. and K.H. Stokoe II : Evaluation of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems by Spectral Analysis of Surface Waves Method, CTR Report No. 256-4, Center for transportation research, University of Texas at Austin, December 1983.
- 55) ビック株式会社：路面下のゆるみ, 空洞調査, カタログ.
- 56) 中野正吉・藤井和成・佐藤長範・荏林茂穂・渡部儀一：多層構造プロファイルの分散性レイリー波による解明(1), 地震学会講演集, pp. 283, 1989.
- 57) Shell Bitumen Review 50, 1975.
- 58) Weber, W.G.Jr., Grey, R.L. and Cady, P.D. : Rapid Measurement of Concrete Pavement Thickness and Reinforcement of Nondestructive Systems, TRB, NCHRP, Report 168, Sept. 1976.
- 59) Eckrose, R.A. : Ground Penetrating Radar Supplements Deflection Testing to Improve Airport Pavement Evaluations. ASTM STP 1026, pp. 563-573, 1989.
- 60) Clemena, G., Prinkel, M. and Long, R. : Use of Ground-Penetrating Radar for Detecting Voids under a jointed Concrete Pavement, TRB, Research Record 1109, 1987.
- 61) Inagaki, M, Tada, H., Kasahara, A., Tomita, H. and McGregor, T. : Subsurface Pavement Structure Inventory using Ground Penetrating Radar and a Bore Hole Camera, ASCE, AATT, pp. 453-457, 1991.
- 62) 関口幹夫・富田 洋・稲垣正晴：舗装構造調査システムの開発, 第19回日本道路会議一般論文集, 1991.

- 63) Berg, F., Jansen, J.M. and Larsen, H.J.E. : Structural Pavement Analysis Based on FWD, Georadar and / or Geosonar Data, Proc. of BCRA, pp.453-461, 1986.
- 64) Automated Pavement Distress Data Collection Equipment Seminar Iowa State University, Ames, Iowa June, pp.12-15, 1990.
- 65) AASHO 道路試験, 社団法人セメント協会, 昭和48年4月.
- 66) Road Surface Characteristics : Their Interaction and Their Optimization, AN OECD SCIENTIFIC EXPERT GROUP PARIS, 1984.
- 67) 建設省評価書, 建技評 84401号, 路面性状自動測定装置の開発.
- 68) G. Lees : Skid Resistance of Bituminous and Concrete Surfacing, Developments in Highway Pavement Engineering-1. Applied Science Publishers Ltd., 1978.
- 69) OECD : Road Surface Characteristics, 1984.
- 70) 市原 薫・小野田光之:路面のすべり, 技術書院, 1986.
- 71) ASTM : Road and Paving Materials ; Traveled Surface Characteristics, Annual Books of ASTM Standards, Vol.04.03, 1989.
- 72) (株)マクロス:ポータブルスキッドレジスタンステスト操作マニュアル.
- 73) 溝口 恵:路面の粗さの測定法, 土木技術資料, 13-4, 1971.
- 74) 山根皓三郎・外崎得雄:滑走路面粗さ測定装置の開発, 航技研ニュース, No.374, 1990.
- 75) 日本セメント技術協会:AASHO 道路試験, 1966.
- 76) FHWA : Evaluation of Pavement Deflection Measuring Equipment, Final Report, 1987.
- 77) Shahin, M.Y. and Kohn, S.D. : Airfield Pavement Performance Prediction and Determination of Rehabilitation Needs, Proc. 5th ICSDAP, pp.637-652, 1987.
- 78) Karan, N.A., Haas, R., Kobi, D.A. and Chetham, A. : Implementation and Verification Examples of Successful Pavements, Proc. 5th ICSDAP, pp.586-597, 1987.
- 79) Phang, W.A. : Pavement-Condition Ratings and Rehabilitation Needs, TRB Research Record, No.700, pp.11-19, 1979.
- 80) Thompson, P.D. and Hatherly, L.W. : The Development and Use of a Pavement Management System in the United Kingdom Proc. 5th ICSDAP, pp.564-579, 1987.
- 81) Gorski, M.R. : The Implementation of the International Road Roughness Experiment for Belgium, TRB, Research Record, No.1084, pp.59-65, 1985.
- 82) ISO/TC108 : Guide for the evaluation of human exposure to whole-body Vibration, ISO2630, 1978.
- 83) 三輪俊輔:全身振動の評価法 (ISO/TC108/DIS2631を中心として), 日本音響学会誌, 29巻4号, 1973.
- 84) 榎戸靖暢・湯川ひとみ:舗装の乗り心地評価と生体反応, アスファルト, Vol.33, No.167, pp.52-66, 1991.
- 85) 青木光子:ドライバーの衛生学, 美津穂出版, pp.198, 1975.
- 86) H. デュビイ・G. ツェレット・松本忠雄・岡田晃他訳:全身振動の生体反応, 名古屋大学出版会, 1989.
- 87) 景山克三・景山一郎:自動車力学, 理工図書, 1985.
- 88) M.G. Pottingen et al : A Review of Tire / Pavement Interaction Noise and Vibration, ASTM STP 929, pp.183, 1986.
- 89) AASHTO : AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986, 1986. (邦訳) 舗装に関する AASHTO 指針, (社)セメント協会, 1990.
- 90) Bester, J. : Effect of Pavement Type and Condition on the Fuel Consumption of Vehicles, TRR 1000, 1984.
- 91) 安崎裕他:舗装の供用性と車両走行費用に関する検討, 舗装, Vol.25-3, 1990.
- 92) Hendrix, W. et al : Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road Surface Characteristics, ASTM STP 1031, 1990.
- 93) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫:ファジィシステム入門, オーム社, 1987.
- 94) 姫野賢治ほか:Fuzzy 数量化理論第Ⅱ類を用いた舗装の路面評価に関する研究, 第45回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1990.
- 95) 姫野賢治ほか:主観を取り入れた道路舗装の路面評価に関する研究, 第46回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1991.
- 96) たとえば, Love, A.E.H. : A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, 4th ed., Dover, 1944.
- 97) 牟岐鹿楼:表面の一部が剛体で圧縮された半無限弾性体の三次元応力問題, 日本機械学会論文集, Vol.21, No.111, 1955.
- 98) 牟岐鹿楼:表面にせん断荷重を受ける半無限弾性体の三次元問題, 日本機械学会論文集, Vol.22, No.119, 1956.
- 99) Mindlin, R.D. : Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid, Physics, Vol.7, 1936.
- 100) Melan, E. : Die Spannungszustand der durch eine Einzelkraft in Innern beanspruchten Halbscheibe, Z. angew. Math. und Mech., Vol.12, 1932.
- 101) Westergaard, H.M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc. HRB, Vol.5, 1925.
- 102) Hogg, A.F.A. : Equilibrium of a Thin Plate, Symmetrically Loaded, resting on a Elastic Foundation of Infinite Depth, Philosophical Magazine, Series.7, Vol.25, 1938.
- 103) 松村孫治:弾性率の深さとともに変化する地盤における基礎の沈下, 土木学会誌, Vol.17, No.11, 1931.
- 104) Marguerre, K. : Spannungsverteilung und Wellenausbreitung in der dicken Platte, Ing. Archiv., Vol.4, 1933.
- 105) Burmister, D.M. : The Theory of Stresses and Displacements in Layer Systems and Applications to Design of Airport Runways, Proc. Highway Research Board, Vol.23, 1943.
- 106) Acum, W.E.A. and Fox, L. : Computation of Load Stresses in a Three-Layer Elastic System, Geotechnique, Vol.2, 1951.
- 107) 木村孟:二層地盤の力学性状に関する解析的研究, 土木学会論文報告集, No.233, 1969.
- 108) 植下協・G.G. マイヤホフ:岩盤上土層表面における弾性変位について, 土木学会論文集, 第143号, 1967.
- 109) 三浦裕二・巻内勝彦:多層地盤の応力・変形解析と東名高速道路路態調査結果の検討, 土と基礎, Vol.17, No.1, 1969.



- 110) 木村孟：土の応力伝播，鹿島出版会，1978.
- 111) Ashton, J.E. and Moavanzadeh, F. : Analysis of Stresses and Displacements in a Three-Layered Viscoelastic System, Proceedings, Second International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1967.
- 112) Odemark, N. : Investigation as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements according to the Theory of Elasticity, Statens Vaginstitut, Meddelande, No.77, Stockholm, 1949.
- 113) Nascimento, U. et al. : A Method of Designing Pavements for Road and Airports, Proceedings, Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, 1961.
- 114) 上田嘉男・西中村和利・増井隆：撓み性舗装に対する層構造の考え方，第7回日本道路会議論文集，1963.
- 115) 須田熙・佐藤勝久：複数円形等分布荷重による多層弾性体中の変位と応力の近似計算法，港研資料 No.146, 1972.
- 116) 姫野賢治・丸山暉彦・菅原照雄：パソコン用多層弾性構造解析システム (ELSA) の開発，第18回日本道路会議論文集，1989.
- 117) Duncan, J.M. et al. : Finite Element Analyses of Pavements, HRB Record, No.228, 1968.
- 118) Marchand, J.P. and Goacolou, H. : Cracking in Wearing Courses, Proceedings, Fifth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1982.
- 119) Tabatabaie, A.M. and Barenberg, E.J. : Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements, TRR, No.671, pp.11-17, 1978.
- 120) 福手 勤・八谷好高・山崎英男：コンクリート舗装目地部における荷重伝達，港湾技術研究所報告，Vol.31, No.2, pp.207-236, 1982.
- 121) 西澤辰男・松野三朗：コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について，土木学会論文報告集，No.338, 1983.
- 122) 西澤辰男：衝撃荷重による舗装の動的挙動について，第46回土木学会年次学術講演会概要集，V-16, 1991.
- 123) Harichandran, R.S., Yeh, M.S. and Baladi, G.Y. : MICH-PAVE : A Nonlinear Finite Element Program for Analysis of Flexible Pavements, TRR, 1286, 1990.
- 124) Cundall, P.A. : BALL-A Program to Model.
- 125) Lytton, R.L. : Backcalculation of Pavement Layer Properties, ASTM STP 1026, p.7, 1989.
- 126) Kasahara, A., Kubo, H. and Sugawara, T. : Estimation of In Situ Elastic Moduli of Pavement Structural Layer with Falling-weight-deflectometer Deflection Basin Proceedings, Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, p.5-90, 1982.
- 127) Ullidtz, P. : Overlay and Stage by Stage Design, Proceedings, Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, p.722, 1977.
- 128) 松井邦人・井上武美・三瓶辰之：舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法，土木学会論文集，第420号，p.107, 1990.
- 129) Himeno, K., Maruyama, T., Abe, N. and Hayashi, M. : The Use of FWD Deflection Data in Mechanistic Analysis of Flexible Pavements, Proceedings, Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, p.401, 1990.
- 130) Uzan, J., Lytton, R.L. and Germann, F.P. : General Procedure for Backcalculating Layer Moduli, ASTM STP 1026, p.217, 1989.
- 131) Irwin, L.H., Yang, W.S. and Stubstad, R.N. : Deflection Reading Accuracy in Backcalculation of Pavement Layer Moduli, ASTM STP 1026, p.229, 1989.
- 132) Cauwelaert, F.J.V., Alexander, D.A., White, T.D. and Barker, W.R. : Multilayer Elastic Program for Backcalculating Layer Moduli in Pavement Evaluation, ASTM STP 1026, p.171, 1989.
- 133) Tam, W.S. and Brown, S.F. : Back-Analyzed Elastic Stiffnesses-Comparison Between Different Evaluation Procedures ASTM STP 1026, p.189, 1989.
- 134) Marchionna, A., Cesarini, M., Fornaci, M.G. and Malgarini, M. : Pavement Elastic Characteristics Measured by Means of Test Conducted with the Falling Weight Deflectometer, TRR 1007, p.46, 1985.
- 135) Stolle, D. and Hein, D. : Parameter Estimates of Pavement Structure Layer and Uniqueness of the Solution, ASTM STP 1026, p.313, 1989.
- 136) Chou, Y.J., Uzan, J. and Lytton, R.L. : Backcalculation of Layer Moduli from Nondestructive Pavement Deflection Data Using the Expert System Approach, ASTM STP 1026, p.341, 1989.
- 137) 土木学会：舗装機能の評価法，舗装機能の評価技術に関するセミナーテキスト，1992.

(1993.6.28 受付)