

FWDによる舗装の構造評価および補修設計システムの開発

丸山暉彦*・阿部長門**・雑賀義夫***・
姫野賢治****

本研究では、Falling Weight Deflectometer (FWD) による舗装の構造評価方法を確立するために、既往の研究で得られたたわみ評価指標の境界値、区間分け、アスファルト混合物層の弾性係数の温度補正について検討を行った。得られた研究成果に基づき、FWD による舗装の構造評価および補修設計システムを開発した。

Key Words : NDT, FWD, elastic modulus, backcalculation, cumulative differences, asphalt temperature, pavement structure, rehabilitation

1. はじめに

現在の舗装の構造設計は、『アスファルト舗装要綱』¹⁾に基づき半経験的な CBR- T_A 法を用いて行われている。この『アスファルト舗装要綱』が平成4年に改訂され、多層弾性理論を用いた設計手法が参考として付録に取り入れられている。これに伴い、各種舗装構成層の弾性係数評価方法が必要となってきた。さらに、近年舗装の維持修繕の重要性が増加し、現場で短時間に舗装の健全度を評価できる非破壊試験 (Nondestructive Testing : NDT) が注目されてきた。非破壊で構造評価を行う装置の中で、実際の交通荷重に類似した衝撃荷重を発生し、この時のたわみを測定する Falling Weight Deflectometer (以下 FWD と略す) が広く使われるようになってきている。この FWD 測定の特徴としては、測定が容易で、短時間に大量のデータ収集を行うことが可能な点である。

また、FWD たわみを用いた舗装の構造評価より以下のような判定を行うことが可能となる。

- 1) 舗装構造同一区間の推定
- 2) 舗装構成層の弾性係数の推定
- 3) 破壊原因の推定
- 4) 舗装寿命の推定

以上の推定を行うには、的確な舗装の構造評価が不可欠であり、現場における非破壊試験結果が重要な意味を持っている。

舗装の構造評価あるいは補修工法の選定および補修断面の設計をするための解析区間を定めるには、一般に舗装構成や補修履歴もしくは路面性状等に基づき分類を

行っている。これらの解析区間を数学的に分割しかつ定める方法として、AASHTO²⁾では累積差法 (Cumulative Difference Value) を提案している。

たわみ性舗装の場合、アスファルトは感温性が高い材料であるために、アスファルト混合物層の弾性係数は温度の影響を受け広範囲の値を示す。したがって、推定したアスファルト混合物層の弾性係数を評価する場合、標準温度に補正を行う必要がある。アスファルト混合物層の弾性係数を補正するには、測定時のアスファルト混合物層の代表温度を把握する必要がある。AASHTO²⁾では、5日間の平均気温と測定時の表面温度からアスファルト混合物層の深さ方向3箇所の温度を推定し、アスファルト混合物層の平均温度を求める方法が提案されている。しかし、この方法では調査項目が多く、平均温度の推定に時間がかかるという欠点を持っている。近藤ら³⁾は、深さ別の温度分布測定結果から熱伝導方程式を補正した半経験式を提案している。この方法は、月平均気温と月代表舗装体内温度で推定するため、推定したアスファルト混合物層の平均温度は1ヶ月間同じ温度となる。

そこで本論文では、解析区間の選定方法やアスファルト混合物層の平均温度の推定および弾性係数の温度補正について検討を行い、FWD による舗装の構造評価方法をまとめた。さらに、舗装の構造評価に基づく補修工法の選択及び補修断面の設計法を提案し、その適用例を示した。

2. 舗装の構造評価および補修設計システム

FWD を用いた構造評価により舗装の構造設計を行うシステムとして、Thompson ら⁴⁾が ILLI-PAVE を開発している。この構造設計プログラムでは、FWD で得られた弾性係数の他に繰返し三軸圧縮試験で得られるレジリエントモジュラス (Resilient Modulus) を用いて

* 正会員 長岡技術科学大学教授 建設系
(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

** 正会員 長岡技術科学大学博士課程 材料工学専攻

*** 正会員 東亜道路工業(株) 技術研究所

**** 正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科

も構造設計が行えるようになってきている。

また舗装の構造評価を行う場合、評価対象の考え方により、FWD測定方法や解析区間の延長等が異なる。舗装マネジメントシステム(PMS)⁶⁾では、管理区域内の道路網全体を管理するネットワークレベルと、ある路線を適当な長さの単位区間として捉え、管理するプロジェクトレベルがある。本研究ではプロジェクトレベルにおける舗装の構造評価およびその維持修繕を対象とする。

本研究で舗装の構造評価に用いているFWD装置を図-1に示す。本FWD装置は10個のたわみセンサでたわみ量を測定している。以下の説明では、たわみ量を D で表し、載荷点からセンサまでの距離(mm)を添字としてつける。つまり、載荷点から1500mm離れた位置のたわみ量を D_{1500} と呼ぶ。

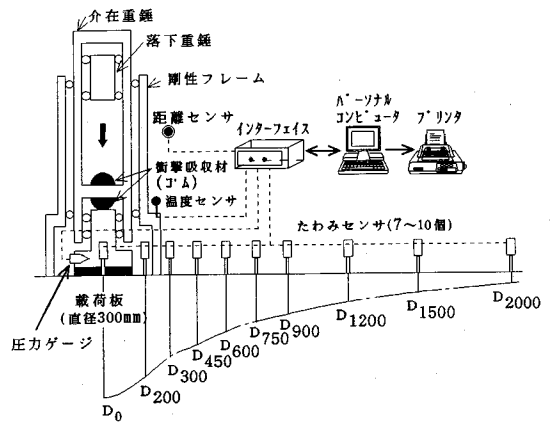


図-1 FWD測定装置

FWDによる舗装の構造評価および補修設計システムのフローを図-2に示す。本フローは、以下に示す2つのサブシステムから構成されている。

- [1] FWDによる測定および構造評価
- [2] 構造評価に基づいた補修工法選定および補修断面設計

本システムはパーソナルコンピュータ(PC-9801)上でFWDによる舗装の構造評価、補修工法の選定、補修断面の設計を行い、自動的にたわみ及び舗装構造データなどのデータベースを作成するものである。

3. 舗装の構造評価

FWD測定後のたわみデータの処理、弾性係数の逆解析、および舗装の構造評価についてのフローを図-3に示す。本章では評価区間の分割方法、アスファルト混合物層の弾性係数の温度補正、たわみ指標の境界値について述べる。

現在まで、FWD測定で得られたたわみ量から舗装の構造評価や補修工法を検討するための評価区間の分け方は、舗装構成、補修履歴、たわみの変化等に基づき行っている。上記の目的のために区間設定を行う方法として、AASHTOで提案されている累積差を本研究で取り入れ、自動分割できるようにした。

アスファルト混合物層の平均温度の推定は、FWD測定中に同時に計測する路面温度と気温を用いて推定する方法について検討した。また、この方法で得られたアスファルト混合物層の平均温度を用いてアスファルト混合物層の弾性係数を温度補正する方法を示す。

既往の研究⁷⁾でたわみ評価指標を提案したが、本システムではこのたわみ評価指標に3段階のランクをつけ、舗装の状態を把握できるようにした。

(1) 解析区間の考え方

ある延長の舗装を評価する場合、舗装構成や路床の支

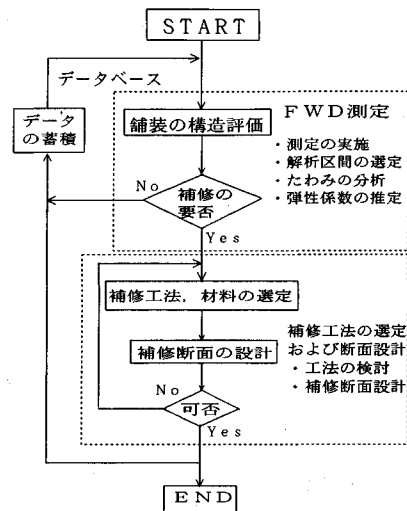


図-2 FWDによる舗装構造評価および補修設計システム

持力等が均一な評価区間を選定する。この評価区間の中で、現状の舗装状態を表す因子がほぼ同じとみなすことができる区間を解析区間と呼ぶ。現況の舗装の状態を表す因子として、たわみ、ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性等があり、この因子より舗装が縦断方向にどのような変化をしているか捉える必要がある⁸⁾。各因子の値を縦断方向にプロットした時、通常かなりばらついており、ある位置で大きく変化することもある。舗装の状態を表す因子のパラツキは、解析区間内変動と解析区間変動に分けられる。解析区間の概念を図-4に示す。

解析区間内変動とは、ほぼ同一の舗装の状態を持っている解析区間で、図-4に示されているような測定値のパラツキで発生している内部変動を示す。この変動は解析区間の評価や設計の信頼性に影響を及ぼす。解析区間変動は、ある評価区間の中で統計的に異なる解析区間がいくつか存在し、これを分割した時の解析区間の違いによる変動を示す。これら解析区間の内部変動や解析区間

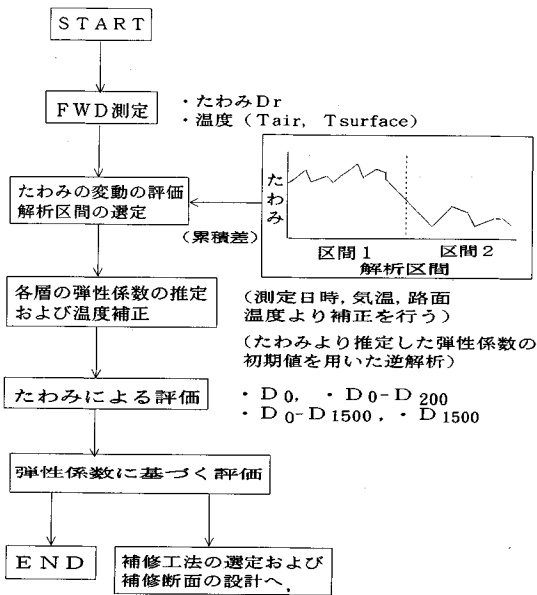


図-3 FWDによる舗装の構造評価

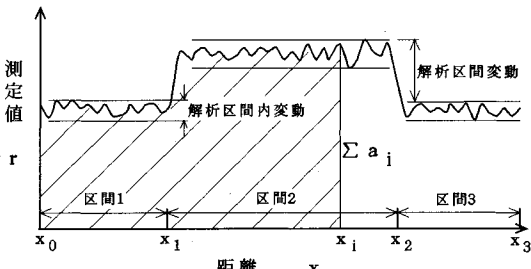


図-4 解析区間の考え方

の違いを把握することは、適切な構造評価や補修断面を検討する際に重要となる。

a) 累積差法

FWD測定は、交通車両の進行方向と並行に舗装のたわみを測定する。たわみ測定は道路の縦断方向に、ある距離 x_i ごとに測定を行う。載荷板中心のたわみ値を縦断方向に連続的に結んだものが図-4である。図中のある距離 x_i における縦断線以下の累積面積 (Σa_i) と、同じ距離 x_i までの平均面積 (\bar{a}_i) の差を累積差 Z_x という。

累積差は測定値 r が連続している場合には積分をして求めるが、FWD たわみは一般に不連続な点における測定値であり、測定間隔も一定ではない。このような場合、式 (1), (2) より数値的に和を求めて累積差を計算することができる。

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{L_p} \left(\sum_{i=1}^n a_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$a_i = \frac{(r_{i-1} + r_i)}{2} \times x_i = \bar{r}_i \cdot x_i \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 Z_x : 累積差

n : n 番目の測定

n_t : 全測定回数

a_i : ($i-1$) 番目から i 番目の面積

r_i : i 番目の測定値

\bar{r}_i : ($i-1$) 番目及び i 番目の測定値の平均

L_p : 区間の全測定長

ある測定路線の累積差をプロットした例を図-5に示す。この図より、測定値が大きく変化しているところで実線の傾きが変化する。この実線の傾きの符号の変化点が、測定値に変化が生じている点の近傍となる。また、測定間隔が一定である場合には、式 (3) で累積差を計算することができる。

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{n}{n_t} \sum_{i=1}^n a_i \dots \dots \dots (3)$$

FWD たわみに累積差による区間分けを適用すると、図-5に示したように評価区間を自動的にいくつかの解析区間に分割することが可能となる。

(2) アスファルト混合物層の弾性係数の温度補正

a) アスファルト混合物層の平均温度

現在までは既往の研究⁹⁾により、路面温度を用いてたわみの温度補正を行っていたが、アスファルト混合物層(以下アスコン層と略す)の平均温度を用いた温度補正は実施していない。そこで、FWD測定と同時に得られる気温と路面温度から簡便にアスコン層の平均温度を推定する方法について検討した。温度測定用に構築した舗装体の断面を図-6に示す。アスコン層の内部温度を測定するために、アスコン層の層厚13cm中に4本の熱電対を埋設した。また、気温は地上2mの百葉箱内の熱電対により測定した。

FWD測定時の路面温度は接触式温度計を用いて測定されるので、この温度計と深さ0.5mmの熱電対の温度を比較した結果、両者の温度を等しいとみなすことができた。各埋設深さの熱電対の温度データを用いて、積分平均により平均温度を求めた結果、深さ7cmの温度と推定した平均温度はほぼ一致した。これより、深さ7cmの温度を平均温度とみなした。

1日のアスファルト混合物層内の温度分布の一例を図-7に示す。1日の温度分布は時刻ごとに異なっている。同じ時刻の月別の温度分布を図-8に示す。同じ時刻の温度分布では、分布形状が類似している月がいくつか存在する。この結果、年間の温度グループを3つに分類した。

深さ7cmの温度を目的変数、気温と路面温度を説明変数とし、年間を3つのグループに分割し、1日を6時から18時まで1時間おきのグループとして、 $13 \times 3 = 39$ 個の重回帰式を導いた。この重回帰式を式(4)に示す。

$$T_{ave} = aT_{su} + bT_{air} + c \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 T_{ave} : アスコン層の平均温度 (°C)

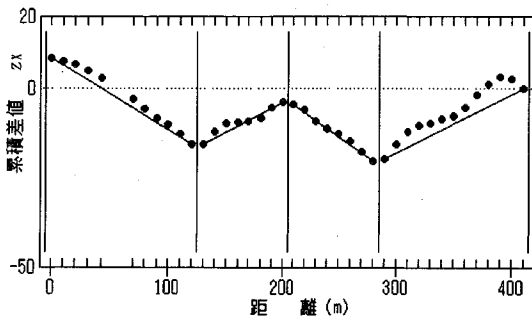


図-5 累積差による区間分けの例

断面図



図-6 温度測定用舗装体の断面

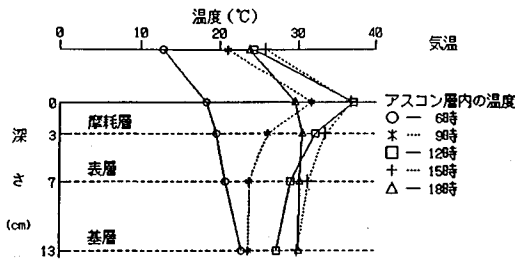


図-7 アスコン層内部の温度分布 (91/5)

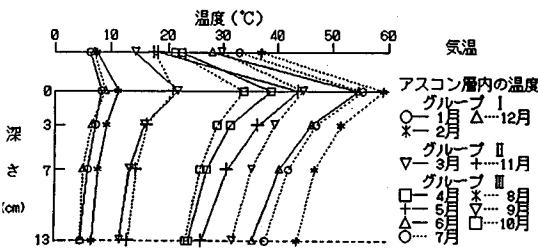


図-8 月別のアスコン層内部の温度分布 (晴天-14時)

T_{su} : 路面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_{air} : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

a, b, c: 推定係数

10月のある1日のアスコン層の平均温度推定結果を図-9に示す。回帰式より推定した結果と深さ7cmの平均温度はよく一致している。この推定式は、アスコン層の厚さ13cmの舗装に対しての式であり、任意厚さのアスコン層の平均温度を推定することが必要である。近藤らや文献¹⁰⁾では、アスコン層の厚さが異なってもアスファルト混合物中の温度分布形状は変わらないので、熱拡散率 k^2 を一定と見なし、温度を推定しても問題は

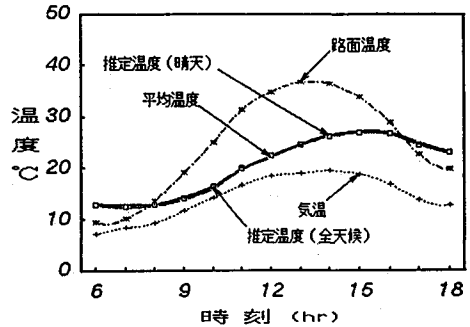


図-9 アスコン層平均温度推定結果 (晴天-89年10月)

ないとしている。任意厚さの平均温度を推定できるように、式(4)の推定式に厚さの補正項を付加し式の拡張について検討した。この厚さの補正項を含んだ推定式を式(5)に示す。

$$T_{ave(z)} = (T_{ave(13)})\alpha Z^{\beta} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $T_{ave(z)}$: 任意層厚のアスコン層の平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{ave(13)}$: 厚さ13cmのアスコン層の平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)

Z: アスコン層の厚さ (cm)

α, β : 補正係数

この平均温度推定式の精度を確認するために、つくば市にある建設省土木研究所構内の舗装体温度データ¹⁰⁾に平均温度推定式を適用し、推定温度と平均温度を比較した。この関係を図-10に示す。アスファルト混合物の層厚20cmの例であるが、この平均平方誤差は 1.5°C であり、実用上問題がないと考えられる。

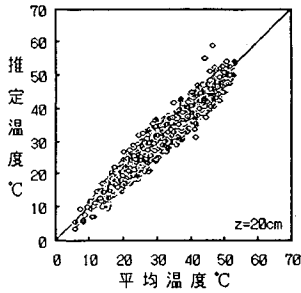
b) アスファルト混合物層の弾性係数の温度補正

前項の結果より、アスコン層の平均温度 ($T_{ave(z)}$) を推定することが可能となった。図-11に、アスコン層の平均温度とFWD測定結果から逆解析を用いて求めたアスコン層の弾性係数の関係を示す。一般に室内試験で得られるアスコン層の平均温度と弾性係数の関係は、高温側で弾性係数が極端に低下するので高次曲線で近似されているが、図-11はFWDから推定したアスコン層の弾性係数であり高温時に極端な弾性係数の低下はみられない。ここでは両者の関係を一次直線で近似した。

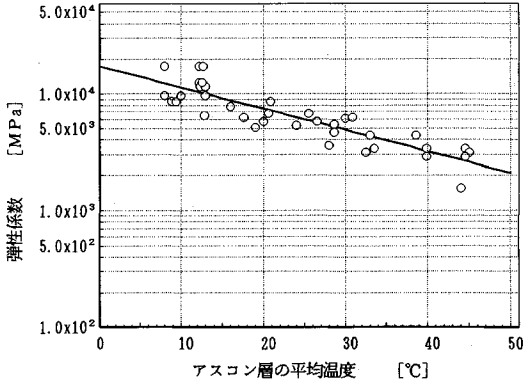
図-11で得られたアスコン層の平均温度と弾性係数の回帰直線の傾きを用いて、平均温度 ($T_{ave(z)}$) のアスコン層の弾性係数 ($E_{as(z)}$) を標準温度 20°C のアスコン層の弾性係数 ($E_{as(20)}$) に補正する。アスコン層の弾性係数の温度補正式を式(6)に示す。

$$E_{as(20)} = E_{as(z)} \times 10^{[-0.0184 \times (20 - T_{ave(z)})]} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $E_{as(20)}$: 標準温度 20°C のアスコン層の弾性係数 (MPa)



図—10 他の舗装体の温度推定結果



図—11 アスコン層の平均温度と弾性係数の関係

$E_{as(z)}: T_{ave(z)}(^{\circ}C)$ のアスコン層の弾性係数 (MPa)

$T_{ave(z)}: FWD$ 測定時のアスコン層の平均温度 ($^{\circ}C$)

この式を用いてアスコン層の弾性係数の温度補正を行い、FWDによる舗装の構造評価を行う。また、アスファルト層の平均温度は、アスファルト混合物層が複数層の場合においても、混合物1層として考える。

(3) たわみ評価指標の境界値

アスコン層の弾性係数の温度補正が可能となったので、標準温度 $20^{\circ}C$ に補正したアスコン層の弾性係数を用いてたわみの再計算を行い、それぞれのたわみ指標の補正を行う。

本構造評価システムでは評価区間の舗装体の状態をたわみから簡便に判断するために、各設計交通量ごとに既往の研究⁷⁾で得られたたわみ評価指標の境界値について検討を行った。ここでは、路床の支持力を含む舗装の強度を表す D_0 、路床の支持力を表す D_{1500} 、アスコン層の強度を表す $D_0 - D_{200}$ 、舗装の強度を表す $D_0 - D_{1500}$ の4つのたわみ評価指標について示した。

A交通、B交通、C交通、D交通の設計期間10年に対応する5tf(49kN)換算輪数をそれぞれ15万、100万、700万、3500万回と見なし、それぞれのたわみ評価指標の5tf(49kN)換算輪数におけるたわみの平均値(D_{ave})

表—1 設計交通量別のたわみ評価指標の境界値

設計交通量	D_0 (mm)		D_{1500} (mm)		$D_0 - D_{200}$ (mm)		$D_0 - D_{1500}$ (mm)	
	good	poor	good	poor	good	poor	good	poor
A交通	≤ 0.71	≥ 0.89	≤ 0.10	≥ 0.20	≤ 0.18	≥ 0.36	≤ 0.64	≥ 0.70
B交通	≤ 0.46	≥ 0.63			≤ 0.07	≥ 0.15	≤ 0.45	≥ 0.49
C交通	≤ 0.34	≥ 0.39			≤ 0.04	≥ 0.08	≤ 0.14	≥ 0.29
D交通	≤ 0.25	≥ 0.32			≤ 0.03	≥ 0.06	≤ 0.12	≥ 0.15

を good (良い) と normal (普通) の境界値とし、たわみの平均値 + 標準偏差 ($D_{ave} + \sigma$) を poor (悪い) と normal (普通) の境界値とした。これを表—1に示す。表—1の結果より、標準温度 $20^{\circ}C$ のたわみより舗装の健全度を3つのランクに分類することが可能となった。

4. 補修工法の選定および補修設計システム

補修工法の選定および補修断面設計フローを図—12に示す。測定時のアスファルト混合物層の平均温度は前節で示した手順で算出し、式(6)より標準温度 $20^{\circ}C$ の弾性係数に補正する。

既往の研究⁷⁾に示したようにたわみ差 $D_0 - D_{1500}$ と T_A の間には一意的な関係があり、たわみ差 $D_0 - D_{1500}$ から舗装体の相対強度を推定することが可能となっている。この値は舗装体の現在有している残存強度 (T_{A0}) に相当するものである。

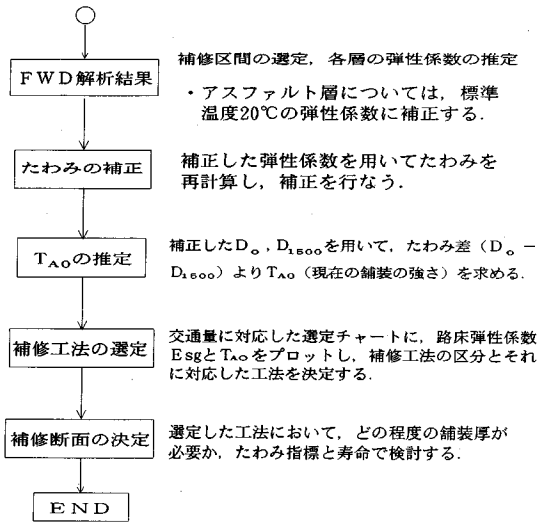
補修工法の選定には、現状の舗装構造の力学特性を表す T_{A0} 、路床弾性係数 E_{sg} 、および交通量区分の3つの値で特性化した補修工法選定チャートを用いて行う。

補修工法選定チャートの一例として、B交通の補修工法選定チャートを図—16に示す。路床弾性係数とCBRの関係は、既往の研究¹¹⁾より粘性土や砂質土で E_{sg} (kgf/cm²) = 100 ~ 200 CBR (E_{sg} (MPa) = 10 ~ 20 CBR)、礫混じり土等は E_{sg} (kgf/cm²) = 50 ~ 100 CBR (E_{sg} (MPa) = 5 ~ 10 CBR) である。補修工法選定チャートの作成は、粘性土や砂質土の中間値である E_{sg} (kgf/cm²) = 150 CBR (E_{sg} (MPa) = 15 CBR) の関係を用いた。図—16に示す評価区分ⅠとⅡの境界はアスファルト舗装要綱の路床の設計 CBR 2未满是路床改良が必要という条件より定め、評価区分ⅢとⅣの境界はアスファルト舗装要綱の設計交通量の目標 T_A 、CBRの関係から導いた。また、評価区分ⅡとⅢの境界は目標 $T_A - 10$ cm とした。

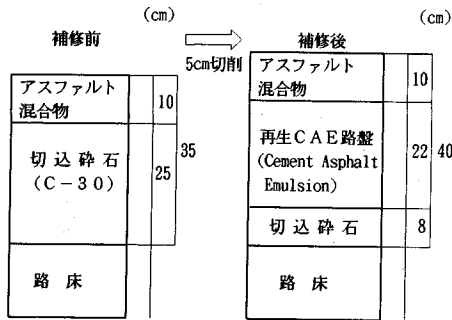
5. 本システムの適用例

(1) 舗装の構造評価

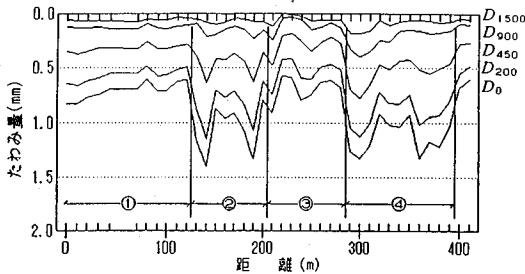
本章では前章までに述べた方法を用いてFWDに基づく舗装の構造評価および維持設計システムの適用例を示す。ここで用いた例は一般県道の測定例である。本路線の設計交通量はB交通で、設計CBRは4である。また、ひび割れ率20%以上の路面状況である。評価区間の舗装構成を図—13に示す。FWDで測定したたわ



図一12 補修工法選定および補修設計のフロー図



図一13 評価区間の舗装構成



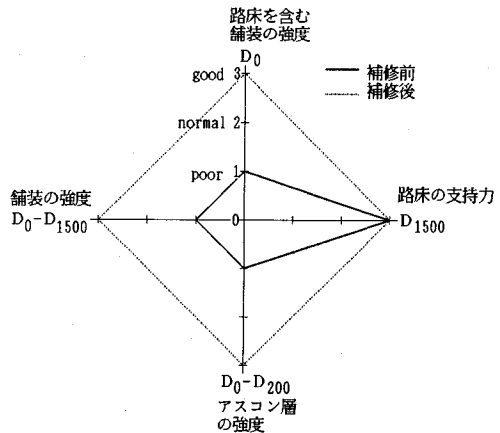
図一14 区間分けを行ったたわみ縦断面図

みを縦断方向にプロットしたたわみ縦断面図を図一14に示す。図一14は、第3章(1)節で述べた累積差を用いて、解析区間を定めた。

たわみの小さい区間①とたわみの大きい区間②の舗装各層の推定弾性係数と構造評価の例を表一2に示す。アスコン層の弾性係数は、測定時の日時、路面温度、気温、アスコン層厚を式(5)に代入し、アスコン層の平均温度を求め、式(5)で得られたアスコン層の平均温度と測定時のアスコン層の弾性係数を式(6)に代入し、標準温度20°Cの弾性係数に補正した。表中の弾性係数の

表一2 舗装各層の推定弾性係数と評価の例

舗装構成	層厚 (mm)	区間①		区間②		備考
		弾性係数 (MPa)	評価	弾性係数 (MPa)	評価	
アスコン層	100	6200	B	3000	C	
切込砕石	250	150	B	85	C	
路床上部	500	65	B	40	C	評価評価
路床下部	∞	130	A	105	A	A: good
たわみ	D0	0.625	C	0.925	C	B: normal
	D0-D1500	0.565	C	0.855	C	C: poor
Eの評価評価		C: poor		B: normal		A: good
アスコン層		< 3000		3000~6000		6000<
切込砕石		< 100		100~300		300<
路床		< 60		60~100		100<



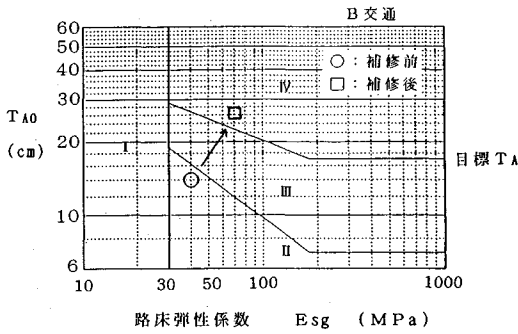
図一15 たわみ評価指標に基づくレーダチャート

ランクは、既往の研究¹²⁾で示した弾性係数の範囲に基づき分類し、たわみのランクは第3章(3)節で示したたわみの境界値に基づき分類した。温度補正後のたわみに基づく評価指標のレーダチャートを図一15に示す。たわみに基づく区間②の舗装の評価は、路床の支持力(路床下部)は満足しているが、舗装(アスコン層、路盤層)の強度が低いことがわかる。

(2) 補修工法の検討

たわみの大きな区間②について、補修工法の検討を行った。FWDで推定した路床弾性係数は40 MPaであり、図一16より目標 T_A は27 cmとなる。温度補正後の D_0 - D_{1500} から求めた T_{A0} は14 cmである。本論文で提案した補修工法選定チャートに補修前の結果を図一16にプロットする。検討区間の補修工法選定チャートの評価ランクはIIとなり、打換え工法程度の修繕が必要となる。現行のCBR- T_A 設計法では、設計時の T_A - T_{A0} が必要オーバーレイ厚となるので、13 cmのオーバーレイが必要である。

前述の結果に基づき、本路線ではアスコン層の全面打換え、再生CAE路盤、打換え工法の3種類の補修方法



評価区分	補修工法
I	路床改良
II	打換え
III	部分打換え, オーバーレイ
IV	舗装強度満足, 破損に応じて対処

図-16 補修工法選定チャート (補修前後)

を提案した。以降では、再生CAE路盤 (Cement Asphalt Emulsion Stabilization) を用いた断面設計例を示す。

a) D_0 のたわみの検討

再生CAE路盤工法で路盤層の厚さを変化させることにより、FWDで生じるたわみがどの程度回復するか検討した。既往の研究^{7),13)}より、アスコン層の弾性係数は6000 MPa、再生CAE路盤の弾性係数は1500 MPaとした。その他の切込砕石、路床の弾性係数は表-2の値を用いた。ここでは、再生CAE路盤厚を変えたときの D_0 のたわみの変化を図-17に示す。表-1に示したB交通の D_0 のたわみ指標より、図-17で検討した再生CAE路盤厚は18 cm以上でgoodのランクに分類される。

b) 舗装寿命の検討

Asphalt Institute (AI)¹⁴⁾の提案しているアスコン層下面の引張りひずみ、路床上面に発生する垂直圧縮ひずみと許容載荷輪数の関係から、再生CAE路盤の層厚を変化させた時に舗装の寿命がどのように変化するか調べた。

前項の D_0 の計算で使用した弾性係数を用いて、輪荷重 $P=5\text{ tf}$ (49 kN)、接地半径 $a=170\text{ mm}$ の条件で舗装体に発生するひずみを求めた。再生CAE路盤厚と路床上面に発生する垂直圧縮ひずみから求めた許容載荷輪数の関係を図-18に示す。

設計年数10年間におけるB交通の許容載荷輪数を100万回とすると、再生CAE路盤の層厚22 cm以上でこの条件を満たす。 D_0 のたわみ指標と舗装寿命の条件を満たす再生CAE路盤厚は22 cmとなり、切込砕石層は8 cm残る。この結果、提案した補修の舗装構成を図-13に示す。

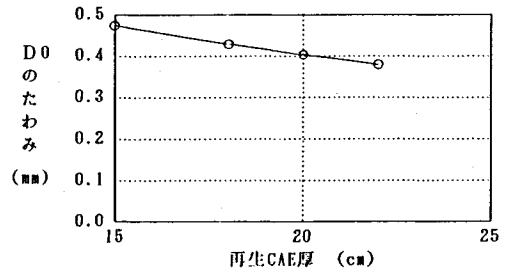


図-17 再生CAE路盤厚の変化による D_0 の変化

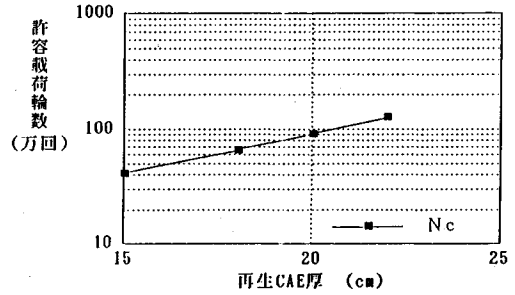


図-18 再生CAE路盤厚の変化による許容載荷輪数の変化

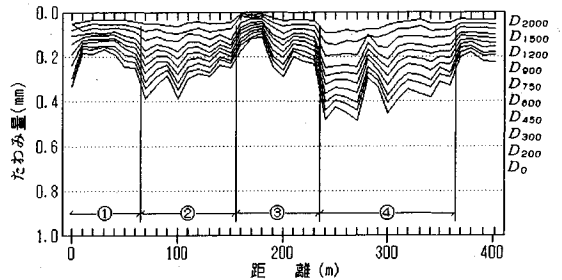


図-19 補修後のたわみ縦断面図

(3) 補修前後の比較

適用例で示した本路線の修繕は、再生CAE路盤を用いた図-13の補修断面で行った。補修1ヶ月後に測定したたわみ縦断面図を図-19に示す。補修前のたわみ縦断面図 (図-14)と比較すると、縦断面図形状は類似しているが、補修後のたわみが明らかに小さい。

補修後の T_{A0} を図-16の補修工法選定チャートにプロットし、補修前と比較した。補修により T_{A0} (残存 T_A)が14 cmから27 cmに回復し、舗装が強固になり路床上面に発生する圧縮応力・圧縮ひずみが減少し見かけの路床弾性係数が上昇している。本論文で提案した補修工法選定チャートの評価区分もIIからIVに上昇した。

6. ま と め

本研究の結論をまとめると以下のようなになる。

- 1) 解析区間を数学的に分割する累積差を適用し、たわみに基づく解析区間を設定した。
- 2) FWD測定中に得られる測定日時、気温、路面温度

より、アスファルト混合物層の平均温度を推定する方法を提案した。

- 3) 測定時の平均温度におけるアスファルト混合物層の弾性係数を標準温度の弾性係数に補正する式を提案した。この結果、温度に関係なくアスファルト混合物層を一樣に評価できるようになった。
- 4) 補正したたわみより T_{A0} (残存 T_A) を推定し、補修工法選定チャートを提案した。
- 5) 現在までに確立された研究成果や本研究で得られた結果に基づき、舗装の構造評価および補修設計システムを開発した。

本研究で提案した補修方法による設計例を一つだけ示したが、他にも多数の設計事例があり、いずれも合理的な補修断面となっている。本システムを実際の舗装における補修に適用することが可能である。

謝 辞

本研究は、長岡技術科学大学技術開発センター研究プロジェクトの研究成果である。研究検討会においてご協力頂いたプロジェクトメンバーの方々に深甚なる謝意を表す。また、データ整理など数多くのご協力を頂いた長岡技術科学大学卒業生三宅克也氏（現銭高組）、およびザイナル・アビデン氏（現マレーシア）に対し、ここに厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，Dec. 1992.
- 2) American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF

PAVEMENT STRUCTURES 1986, pp. III-17 ~ III-22, 1986.

- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1986, Appendix L, pp.L-1 ~ L-3, 1986.
- 4) 近藤佳宏・三浦裕二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究，土木学会論文集，No. 250, pp. 123~132, 1976. 6.
- 5) Thompson, M. R. : ILLI-PAVE Based NDT Analysis Procedures, ASTM STP 1026, pp.487~501, 1989.
- 6) Hass, R. and Hudson, W.R. : Pavement Management Systems, McGRAWHILL, 1978.
- 7) 阿部長門・丸山暉彦・姫野賢治・林正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No. 460, V-18, pp. 41~48, 1993. 2.
- 8) 雑賀義夫：FWDによるたわみ測定の実際，アスファルト，Vol. 35, No. 175, pp. 21~27, 1993. 5.
- 9) 原田尚幸ほか：FWDたわみの温度補正，土木学会第44回年次学術講演会，V-21, pp. 96~97, 1989.
- 10) 姫野賢治・渡辺隆・勝呂太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究，土木学会論文集，No. 366, V-4, pp. 123~132, 1986. 2.
- 11) 丸山暉彦ほか：FWDによる舗装診断システム，舗装，Vol. 23, No. 11, pp. 16~20, 1988.
- 12) 三宅克哉ほか：路盤層及び安定処理層の弾性係数，土木学会第45回年次学術講演会，V-36, pp. 98~99, 1990.
- 13) 雑賀義夫ほか：FWDによる再生CAE路盤の弾性係数の評価，土木学会第47回年次学術講演会，V-15, pp. 62~63, 1992.
- 14) The Asphalt Institute : Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), pp.8~11, 1982.8.

(1993. 6. 11 受付)

DEVELOPMENT OF STRUCTURAL EVALUATION AND REHABILITATION DESIGN SYSTEM FOR PAVEMENT USING FWD

Teruhiko MARUYAMA, Nagato ABE, Yoshio SAIKA and Kenji HIMENO

To establish structure evaluation using Falling Weight Deflectometer (FWD), the results obtained in the past study were examined in this report ; the deflection indices, section division and temperature correction for asphalt mixture's elastic modulus.

On the basis of these factors, the structural evaluation and rehabilitation design system was developed.