

支持力を考慮に入れた舗装の維持修繕計画の最適化

姫野賢治¹・弓削富司夫²・石谷雅彦³・亀山修一⁴・笠原 篤⁵

¹フェロー会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日 1-13-27)

²正会員 大成ロテック(株) 技術部 課長 (〒104 東京都中央区京橋3-13-1)

³正会員 博士(工学) 大成ロテック(株) 技術部 課長 (〒104 東京都中央区京橋3-13-1)

⁴正会員 博士(工学) 北海道工業大学講師 工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

⁵フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

1989年以降建設省によって舗装構造とその路面性状に関して全国28箇所で行われている新基準調査のデータに基づいて、舗装のパフォーマンスを評価した。得られたパフォーマンスカーブとFWDによって測定されたたわみ量との関係を明らかにすることによって、舗装の支持力を取り入れたパフォーマンスモデルを構築した。また、得られた関係を用いて、国道12号において測定したFWDたわみから、MCIを通じて舗装のパフォーマンスを予測し、遺伝的アルゴリズム(GA)によって修繕(オーバーレイ)計画の最適化をおこなった。

Key Words : MCI, performance, FWD, bearing capacity, maintenance and rehabilitation strategy, genetic algorithm

1. はじめに

現在、わが国においては舗装のサービス性能を表す指標としてMCIが広く使われている。MCIはわだち掘れ量、平坦性、ひび割れ率などの路面性状値から算出される。舗装のパフォーマンスは、累積交通量と路面調査から算出されるMCIを回帰分析することによって得られる。しかしながら、路面性状値と累積交通量のみからパフォーマンスを推定した場合、舗装の健全度(支持力)がパフォーマンスに及ぼす影響を評価することができない。

著者らは以前、建設省基準調査データ¹⁾から得られた舗装のパフォーマンスと多層弾性論から算出される舗装表面のたわみ量との関係を求め、舗装の支持力(たわみ量)からパフォーマンスを予測することを試みた²⁾。しかしながら、解析に用いたたわみは多層弾性論から算出したものであり、実際に測定されたたわみを用いていなかった。

1989年以降、建設省によって行われている新基準調査³⁾では、わだち掘れ、平坦性、ひび割れ率、などの路面性状値の他にFWDによるたわみ量も継続的に測定している。本研究では、新基準調査から得られた路面性状データから算出した舗装のパフォーマンスとFWDによって測定されたたわみ量との関係を明らかにすることを目的とした。

また、得られたパフォーマンスモデルを用いて国道12号において測定されたFWDたわみから各区分内のパフォーマンスを予測し、遺伝的アルゴリズム⁴⁾(Genetic Algorithm: 以下単にGAと言う)によって最も経済的となる修繕(オーバーレイ)計画を求めた。本研究の流れを図-1に示す。

2. MCIの算出

解析には1989年から1994年までの5年間の新基準調査データを用いた。新基準調査は1989年以降、建設省土木研究所によって、全国の28箇所において継続的に行われている調査であり、路面性状調査の他に、FWDによるたわみ量測定、すべり抵抗、環境調査、交通に関する調査なども実施している。

新基準調査から得られたひび割れ率、わだち掘れ、平坦性から各調査路線の各年度におけるMCIを式(1)によって算出する⁵⁾。

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad (1)$$

ここで、

C : ひび割れ率 (%)

D : 最大わだち掘れ深さ (mm)

σ : 平坦性 (mm)

ただし、新基準調査においては4種類のひび割れを軽度、中度、重度の3段階に分割していることから、式(2)を用いて調査結果をひび割れ率 (C) に変換した。

$$C = \{(a+b+c) + (d+e+f) + 0.5(g+h+i) + 0.5(0.2j+0.5k+l)\} / mn \quad (2)$$

ここで、

m : 調査した車線の幅 (m)

n : 調査区間の距離 (m)

網状ひび割れ (m) 軽度 a, 中度 b, 重度 c

角型ひび割れ (m) 軽度 d, 中度 e, 重度 f

縦断ひび割れ (m) 軽度 g, 中度 h, 重度 i

横断ひび割れ (本) 軽度 j, 中度 k, 重度 l

また、わだち掘れと平坦性については内側わだち部と外側わだち部の2箇所測定されているが、本研究ではこのうち、測定値の大きい方を用いた。

3. 舗装のパフォーマンス

式(1)で算出された MCI と大型車交通量 W から、各路線における舗装のパフォーマンスを求める。建設省土木研究所では、新基準調査以前におこなわれた基準調査データからパフォーマンスカーブを式(3)のような指数関数で近似し、比較的良好な結果を得ていることから¹⁾、本研究においても式(3)を用い、各路線におけるパフォーマンスカーブを求めた。

$$W = A(MCI_0 - MCI)^B \quad (3)$$

ここで、

W : 累積大型車交通量 (万台)

MCI₀ : MCI の初期値 (= 9.5)

A, B : パラメータ

ただし、供用開始時における MCI (MCI₀) はすべての路線において、9.5 と仮定した。

B=1 とし、A を 100 ~ 400 の範囲で変動させたときのパフォーマンスカーブを図-2 に、また、A=200 とし、B を 0.6 ~ 4.0 の範囲で変動させたときのパフォーマンスカーブを図-3 に示す。パラメータ B はパフォーマンスカーブの形状に、パラメータ A はパフォーマンスカーブの横軸 (大型車交通量) 方向への拡大率に影響を与えている。

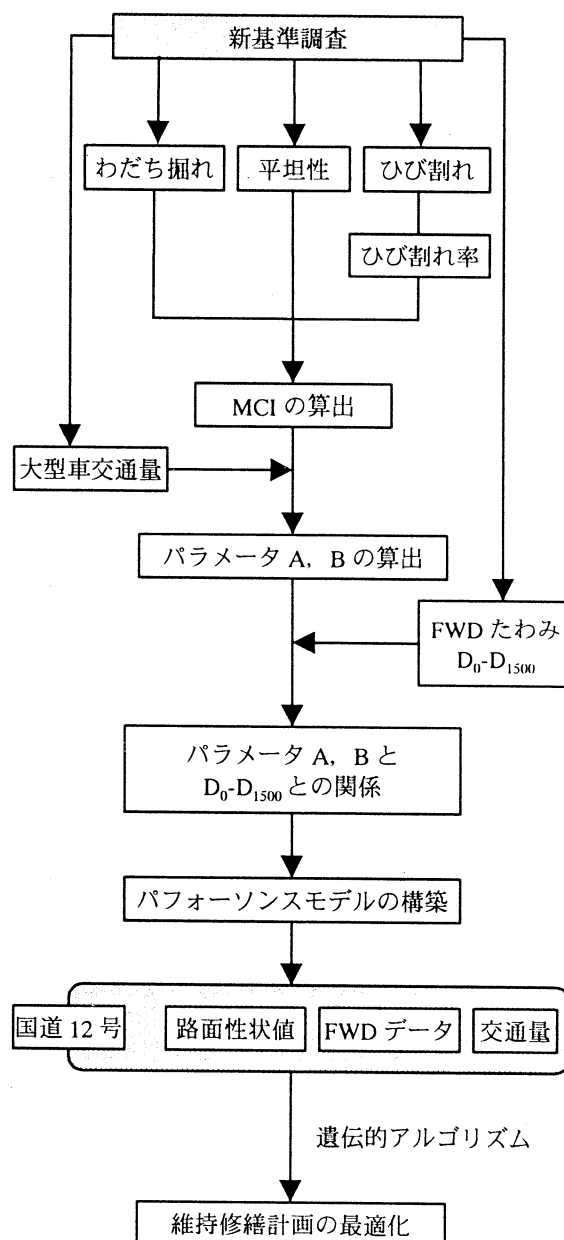


図-1 解析の流れ

新基準調査から得られたパフォーマンスカーブの一例 (901 : 国道 3 号岡垣 BP, 902 : 国道 10 号椎田道路, 903 : 国道 203 号東多久 BP) を図-4 に示す。

4. FWD たわみと舗装のパフォーマンスの関係

舗装体の支持力を取り入れたパフォーマンスモデルを構築するために、上述した解析から得られたパラメータ A, B と、FWD 測定から得られたたわみ量との関係を求めた。

FWD 測定時における舗装表面温度は各路線によって異なることから、最初に、たわみの温度補正を

おこなった。本研究では、測定たわみを直接補正する手法ではなく、一旦、測定たわみを用いて逆解析をおこない、得られたアスファルト混合物層の逆解析弾性係数を山本らの方法⁹⁾によって基準温度

(25℃)における弾性係数に変換し、その後、多層弾性論によって表面たわみを算出した。

阿部らの研究⁷⁾により、FWDの測定たわみ D_0 と D_{1500} の差($D_0 - D_{1500}$)と T_A の間には相関があることが明らかになっていることから、本研究では舗装体の支持力を表す指標としてたわみ差 $D_0 - D_{1500}$ を用いることにした。

各路線において得られたパラメータ A 、 B と、温度補正されたたわみ差($D_0 - D_{1500}$)との関係をそれぞれ図-5、図-6に示す。両者の関係を指数関数によって近似したところ、式(4)および式(5)に示すような関係が得られた。これらの間に高い相関は見られなかったが、本研究では、舗装マネジメントシステムに基づく維持修繕計画のフレームワークを構築することを主な目的としていることから、これらの式によってFWDたわみからパフォーマンスを予測することとした。

$$A = 6.289 \exp\{28.79(D_0 - D_{1500})\} \quad (4)$$

$$B = 2.439 \exp\{-13.2(D_0 - D_{1500})\} \quad (5)$$

たわみ差 $D_0 - D_{1500}$ をパラメータとしたときにおけるMCIと累積大型車交通量の関係を図-7に示す。この図から、たわみ差が小さいときには舗装体の支持力が大きいため、MCIはほとんど低下しないが、たわみ差が大きくなるにつれMCIの低下が著しくなることが分かる。

5. 国道12号の修繕計画の最適化

本研究で構築した支持力を考慮に入れたパフォーマンスモデルを用いて舗装の修繕計画の最適化をおこなった。国道12号から最適化する区間(平均区間長:100m, 区間数:30)を選定し、測定された初年度のMCIとFWDたわみ、および交通量データから区間内におけるパフォーマンスを予測した。予測されたMCIを基に解析期間内に必要となるトータルコストを算出し、これを最小とする修繕計画を決定した。ただし、解析期間は20年、修繕方法は切削オーバーレイ、修繕後のMCIは9.5に回復するものとした。また、修繕の前後において、パフォーマンスカーブの形状には変化がないものと仮定した。

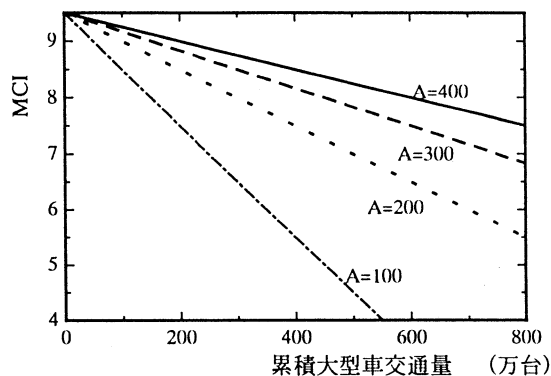


図-2 パラメータ A とパフォーマンスカーブの関係
(パラメータ $B = 1$)

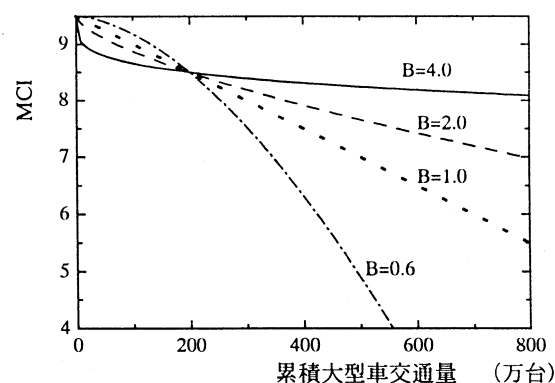


図-3 パラメータ B とパフォーマンスカーブの関係
(パラメータ $A = 200$)

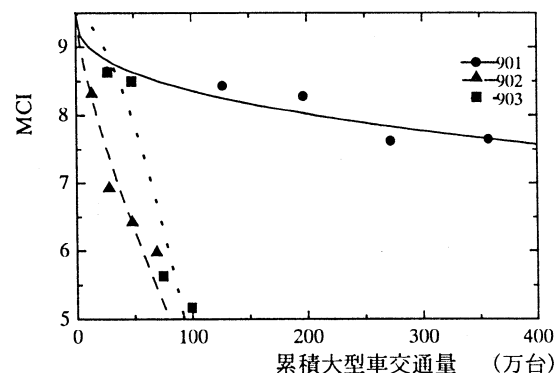


図-4 パフォーマンスカーブ

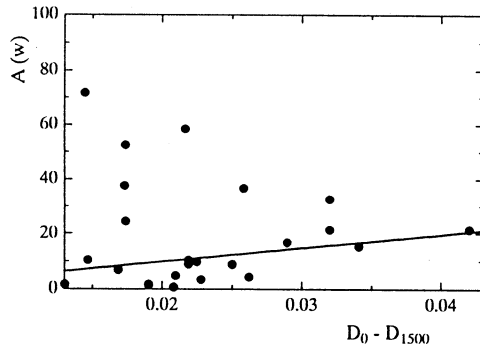


図-5 パラメータ A とたわみ差 $D_0 - D_{1500}$ の関係

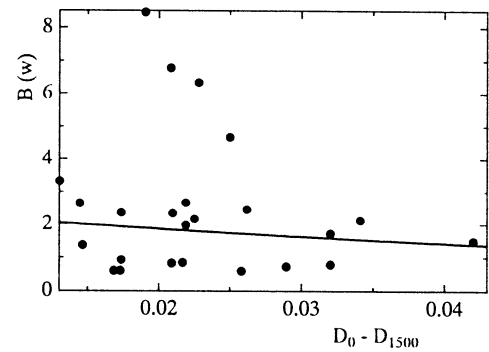


図-6 パラメータ B とたわみ差 $D_0 - D_{1500}$ の関係

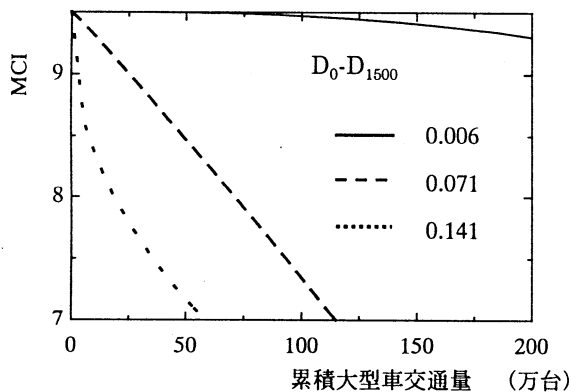


図-7 たわみ差 $D_0 - D_{1500}$ とパフォーマンスカーブの関係

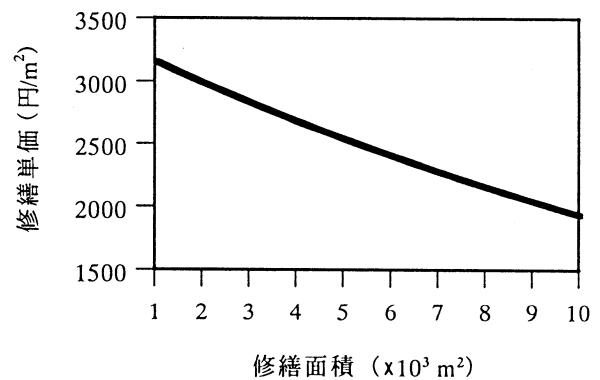


図-8 修繕面積と修繕単価の関係

(1) トータルコストの算出

各区間において測定された FWD たわみから式(4)、(5)によってパラメータ A, B を決定し、各区間内の大型車交通量データをもとに、式(3)によって各年度の MCI を算出した。得られた MCI から式(6)によって解析期間内に必要となるトータルコストを算出した⁸⁾。

$$tpwc_n = \sum_{i=1}^n \{ pwf_{i,n} (OC + MC + UC) \} \quad (6)$$

ここで、

$tpwc_n$: トータルコスト (評価関数)

$pwf_n = 1/(1+i)^n$, i : 割引率 (8%)

OC : 修繕費用

MC : 維持費用

UC : 利用者費用 (車両走行費)

1m^2 当たりの修繕単価は、修繕面積の関数であり、修繕面積が大きいほど単価が安くなることから、修繕費用の算出には式(7)で表されるロジスティック曲線を用いた。修繕面積と修繕単価の関係を図-8 に示す。

$$OC = \frac{-1.24 \times 10^6}{1 + 3.70 \times 10^2 \cdot \exp(5.44 \times 10^{-2} \cdot s)} \times s \quad (7)$$

ここで、

s : 修繕面積 ($\times 10^3 \text{ m}^2$)

道路管理者による維持管理費用 (MC) と MCI の関係は、建設省によって式(8)のように報告されている⁹⁾。

$$MC = (180 - 18.8 \times MCI) \times s \quad (8)$$

また、利用者費用としては、車両走行費のみを対象とした。車両走行費（UC）と MCI の関係は安崎ら¹⁰⁾が報告している式(9)を用いた。

$$UC = (7.6 - 1.6 \times MCI + 0.09 \times MCI^2) \times nl \quad (9)$$

ここで、

n : 車両走行台数

l : 区間長

(2) 遺伝的アルゴリズムの適用

解析年数 20 年、区間数 30 の場合、修繕をおこなうか否かの組み合わせは $2^{20 \times 30}$ 通りにも達し、従来の最適化手法では多大な計算時間を要してしまうことから、本研究では最適化手法として GA を採用した。GA は生物集団の進化過程に着想を得た、確率的探索方法であり、本問題のような莫大な組み合わせとなる場合でも、短時間で最適解近傍に到達できるという特徴を有している。GA による修繕計画の最適化の流れを図-9 に示す。

(3) 最適化された修繕計画

GA によって最適化された修繕計画における MCI の推移を図-10 に示す。この図から MCI は供用年数の増加とともに低下し、MCI が約 4 以下になると修繕が必要となることが分かる。

次に、MCI がある値以下になったときにオーバーレイをおこなうものとし、解析期間内において必要となる総コストを算出した。MCI の下限値を 1 ~ 6 と変動させ、下限値に到達したときに修繕をおこなった場合に必要となる総コストと GA によって得られた修繕計画に要する総コストを表-1 に示す。

MCI の下限値を 1 ~ 6 に変動させた場合、総コストが最小となる MCI は 4 であり、この値より MCI が大きくなっても、あるいは小さくなっても総コストは増大する。一方、GA によって最適化された維持修繕計画の総コストは、MCI の下限値を 4 とした場合に必要となる総コストとほとんど変わらないことから、維持修繕計画が最も経済的となる MCI、すなわちオーバーレイを実施するか否かの基準値を GA によって決定することができる。

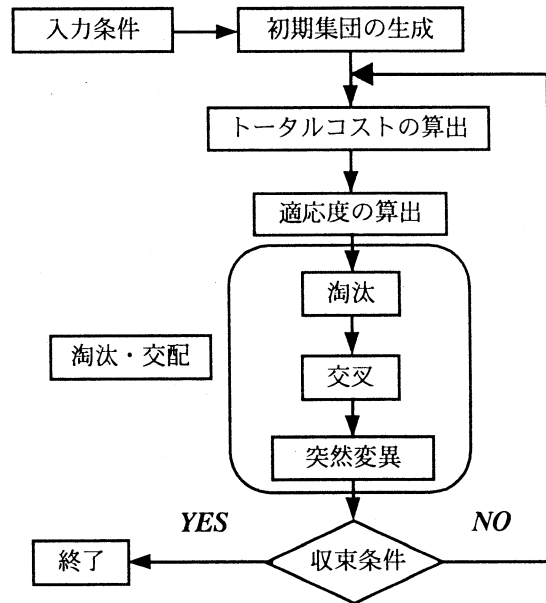


図-9 遺伝的アルゴリズムの流れ

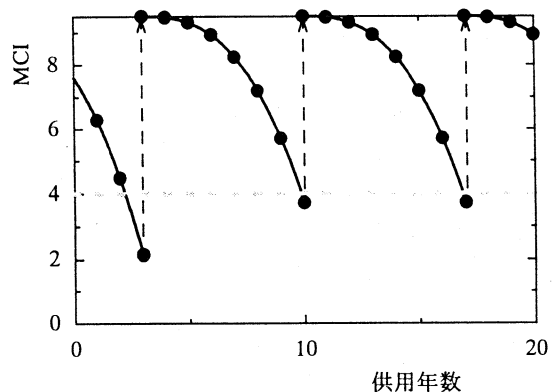


図-10 GA によって最適化された修繕計画

表-1 トータルコストの比較

MCI の下限値	トータルコスト (万円)
1	31511
2	28846
3	25920
4	25090
5	26172
6	27187
GA	25245

6. 結論

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 新基準調査によって得られたデータから、調査路線における舗装のパフォーマンスを求めた。
- 得られたパフォーマンスカーブとFWDによって測定されたたわみ量(D0-D1500)との関係を求め、舗装の支持力に基づくパフォーマンスモデルを構築した。
- 本手法によって得られたパフォーマンスモデルを用いて、国道12号において測定されたFWDデータから舗装のパフォーマンスを予測し、解析期間内に必要となるトータルコストが最小となる修繕計画を遺伝的アルゴリズムによって求めた。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所資料：アスファルト舗装の構造設計に関する検討検討報告書，土木研究所資料第3041号，1991。
- 2) Ishitani, M., Kameyama, S., Himeno, K., Kasahara, A. : " Maintenance and Rehabilitation Strategy at Network
- Level of Pavement Management Systems using Genetic Algorithms. ", Proceeding of the Second International Conference on Road & Airfield Pavement Technology, Vol. 2, pp. 674 ~ pp.682, 1995.
- 3) 中村、伊佐：新基準調査結果報告初期調査編（その1），（その2），土木研究所資料第3157号，1993. 4
- 4) Gordberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- 5) 建設省道路局国道第1課，土木研究所：舗装の維持修繕の計画に関する調査研究，第35回建設省技術研究会報告，昭和54年。
- 6) 山本富業，松尾憲政：FWDによるアスファルト混合物層の推定弾性係数に関する検討，第20回日本道路会議論文集，pp. 368 - 369, 1995.
- 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) R. Hass, W. R. Hudson and J. Zaniewski : *Modern pavement management*, Krieger publishing company, Florida, 1994.
- 9) 建設省：舗装の管理水準と維持修繕工法に関する総合的研究，第41回建設省技術研究会報告，1987.
- 10) 安崎裕，片倉弘美，伊佐真秋：舗装の供用性と車両走行費用に関する検討，舗装，Vol. 25, No. 3, 1990.

OPTIMIZATION OF PAVEMENT MAINTENANCE AND REHABILITATION STRATEGY CONSIDERING ITS BEARING CAPACITY

Kenji HIMENO , Fujio YUGE, Masahiko ISHITANI,
Shuichi KAMEYAMA and Atsushi KASAHARA

Pavement performance is evaluated based on " New Investigation on national highways " carried out by Japanese Ministry of Construction since 1989 related to pavement structures and surface conditions. Combining the performance curves and the measured FWD deflections, a new performance model is proposed taking pavement structural adequacy into consideration. The proposed model is applied on Japanese National Highway No.12, and an attempt is made to optimize pavement rehabilitation strategy using Genetic Algorithm (GA) through FWD deflection measurements and performance prediction in terms of Maintenance Control Index (MCI).