

(22) 舗装のライフサイクルにおける修繕管理の最適化システム

An Optimization System for Pavement Repair Program during the life-cycle

斎藤雅道*
Masamichi SAITOH

堀木 賢一**
Ken-ichi HORIKI

福田 正***
Tadashi FUKUDA

A neuro-computing pavement performance model equipped with 4 input units of T_A , volume of large vehicles, design CBR and surface course material and an output unit of MCI was incorporated into a project-level optimization system for pavement repair program. By using this system, we can decide an optimal repair program, and also, an initial pavement design which minimizes the life-cycle cost.

Key Words: *life-cycle cost, project level management system, neural network, dynamic programming*

1. はじめに

アスファルト舗装は、交通の供用に伴って路面が劣化し、修繕が必要とされるようになる。アスファルト舗装のストックが増加しているなかで、その修繕の管理を合理的に行う管理システムが必要とされている。このような管理システムには、プロジェクト型とネットワーク型がある。ここでプロジェクト (Project) とは、同一の交通条件、舗装構造をもつ一つの道路区間を意味する。また、ネットワーク (Network) とは、複数のプロジェクト群を意味する。本研究において対象とした舗装管理システムはプロジェクト型であり、舗装の初期設計や修繕計画などの決定を行うものである。

このような管理システムにおいて、舗装の路面性状の挙動を予測するパフォーマンスモデルには、既往の研究では決定論モデルや確率論モデルが用いられている。しかし、これらのパフォーマンスモデルの場合、対象とする地域特有の路面性状特性を考慮にいれ、各地方毎にパフォーマンスモデルを作成したり修正することは容易でない。そこで本研究においては、舗装の路面性状データをニューラルネットワークで学習させて作成したパフォーマンスモデル (以下、本論文においてはニューロパフォーマンスモデルと呼ぶ) を用いた。

管理システム、すなわち最適化システムに動的計画法を用いた研究には、水野 (1989 年)²⁾、孔 (1994 年)³⁾らの研究がある。しかし、これらの研究においては、修繕時期の最適化が主な対象で、修繕方法の最適化は対象とされていない。しかし、より経済的な管理を行うためには、対象とする舗装の設計条件に適した修繕工法、すなわちオーバーレイの最適な厚さの選択が必要である。そこで本研究においては、ニューロパフォーマンスモデルを組み入れ、動的計画法により修繕時期及び修繕工法の両者の最適化を行う管理システムを構築した。このシステムによって、舗装のライフサイクルコスト、すなわち道路管理者費用 (修繕費用と日常管理費用) と利用者費用 (燃費等) の合計を最小とする、最適な条件を決定することができる。

*	東北大学大学院 情報科学研究科	(〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)
**	工修 日本電信電話株式会社 NTT青森支店	(〒030 青森県青森市橋本2-1-6)
***	工博 東北大学大学院 情報科学研究科	(〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

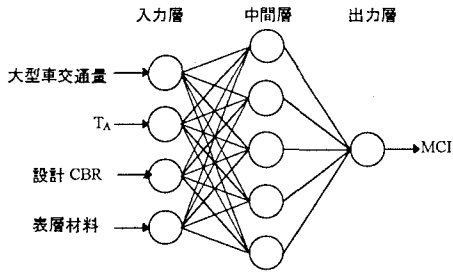


図-1 本研究で用いるニューラルネットワーク

2. プロジェクト型最適化システム

(1) パフォーマンスモデル

舗装管理システムの中核機能をなすものは、システムに組み込まれる舗装のパフォーマンスモデルと、次項で述べる最適化手法である。このようなパフォーマンスモデルには、一般的な決定論モデルと、舗装の破損遷移の不確実性を考慮した確率論モデルなどがある。前者については AASHTO モデル³⁾、後者についてはマルコフ確率モデル⁴⁾等が挙げられる。しかし、これらのパフォーマンスモデルは地域毎に異なる路面性状の特性を反映することは困難である。そこで、ニューロパフォーマンスモデルを用いることにより、各地域における路面性状データの特性に合致するパフォーマンスモデルを作成した。このニューロパフォーマンスモデルは、管理対象の舗装から直接入手したデータを学習させることによって、モデルを容易に作成し、さらに修正することができる。

本研究においては、アスファルト舗装のパフォーマンスモデルとして図-1 に示すような、等価換算厚 T_A 、設計 CBR、累積大型車交通量、表層材料の 4 ユニット入力構造とし、供用性指数 MCI を出力するニューロパフォーマンスモデル⁵⁾を作成した。学習の対象としたのは東北地方の国道 15 箇所 103 個のデータである。以上のデータを 30000 回学習させた結果のパフォーマンスを図-2、図-3 に示す。なお予測パフォーマンスとは、 T_A 、設計 CBR、表層材料の種類を指定して、累積大型車交通量を入力した場合の MCI の出力を表している。

また、厚さ d のオーバーレイを施工した後の舗装の等価換算厚は、次式の T_{AR} によって表されるものとした。

$$T_{AR} = d + \alpha \cdot T_A \cdots \cdots (1)$$

ここで、

T_A : 修繕時における既存舗装の等価換算厚 (cm)

T_{AR} : 修繕後における舗装の等価換算厚 (cm)

α : その舗装の残存寿命を表す指標で、ここでは $\alpha = 0.8$ とした。³⁾

(2) 最適化手法

本システムにおいては、最適化手法として動的計画法 (Dynamic Programming) を使い、最適な修繕計画と修繕工法の決定を行う。修繕工法としては、単一工法 (道路管理において一般的に採用されている厚さ 5 cm のオーバーレイのみ) の場合、及び複数工法 (厚さ 1cm 刻みで、3~10cm のオーバーレイ厚を可変とする) の場合の 2 種類を考慮した。

採用された厚さのオーバーレイにより修繕後の T_A が異なり、舗装のパフォーマンスが異なるので、その後のライ

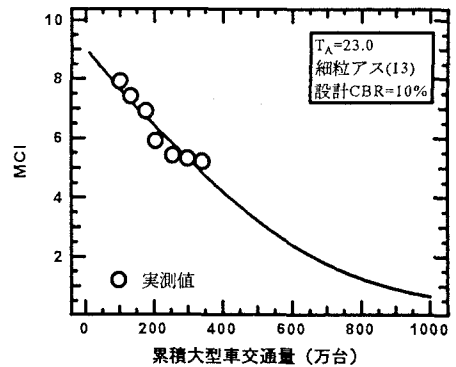


図-2 実測値と予測パフォーマンスの例

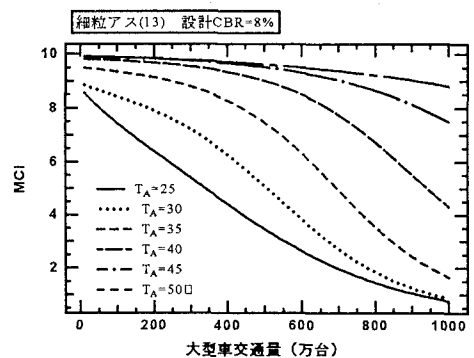


図-3 ニューロパフォーマンスモデルの出力例

フサイクルコストが異なってくる。そこで、修繕厚さに対応する修繕後の T_A ごとに最適性原理に基づく費用の定式化を行う。次に、これらの式から最小費用のプロセスを決定する。

$$f_i(T_A, M(i)) = \min \begin{cases} c(T_A, M(i)) + f_{i+1}(T_{A0}, M(i+1)) \\ \left[c(T_{AR_{d1}}, M(0)) + R_{d1} \right] + f_{i+1}(T_{AR_{d1}}, M(1)) \\ \vdots \\ \left[c(T_{AR_{dn}}, M(0)) + R_{dn} \right] + f_{i+1}(T_{AR_{dn}}, M(1)) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

R_{dn} : 厚さ d_n のオーバーレイの修繕費用 ($d_n=3\sim10$)
 T_{ARdn} : 厚さ d_n のオーバーレイを施工した後の等値換算厚
 $M(i)$: 供用年数 t 年後の MCI
 $f_i(T_A, M(i))$: 舗装の T_A 、状態 $M(i)$ の舗装を最適に管理するための t 年目以降の費用
 $c(T_A, M(i))$: 舗装の T_A 、状態 $M(i)$ の舗装の管理者費用と利用者費用の合計

なお本システムにおいては、現在価値法に基づいて解析を行う。図-3 に本システムのフローチャートを示す。

3. 解析事例

(1) ライフサイクルコスト

管理者費用（初期建設費用＋維持修繕費用）と利用者費用（燃費）の和を舗装のライフサイクルコストとする。利用者費用は安崎ら⁷⁾の研究、また管理者費用は建設省の研究⁸⁾を参考に作成された次式³⁾を用いる。

$$MC = 180 - 18.8 \cdot MCI \dots\dots\dots (3)$$

$$UC = 7.6 - 1.6 \cdot MCI + 0.09 \cdot MCI^2 \dots\dots\dots (4)$$

また、初期建設費用と T_A の関係は次式(5)³⁾を用いる。

$$IC = 356.64 \cdot T_A - 382.20 \dots\dots\dots (5)$$

(2) 修繕工法

層厚 3cm～10cm (1cm 刻み) のオーバーレイを修繕工法として採用した。修繕費は宮城県土木部の積算基準を基に積算した。その結果は(6)式のようになる。

$$R_d = 392.14 \cdot d + 1887.86 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

d : オーバーレイ厚 (cm)

(3) その他の解析条件

道路延長 : 1 km、道路の幅員 : 3.5m
 解析期間 : 10～30 年、設計 CBR : 6、8、10、12％
 割引率 : 8％、 T_A : 20～50

表層材料 : 細粒度アスファルト混合物(13)

交通区分 : B、C、D 交通それぞれの 1 方向当たりの交通量 (台／日・車線) は、表-1 の値とした。

(4) 最適 T_A

図-5 は C 交通、解析期間 30 年、割引率 8％の場合について舗装の初期 T_A とライフサイクルコストの関係を示した

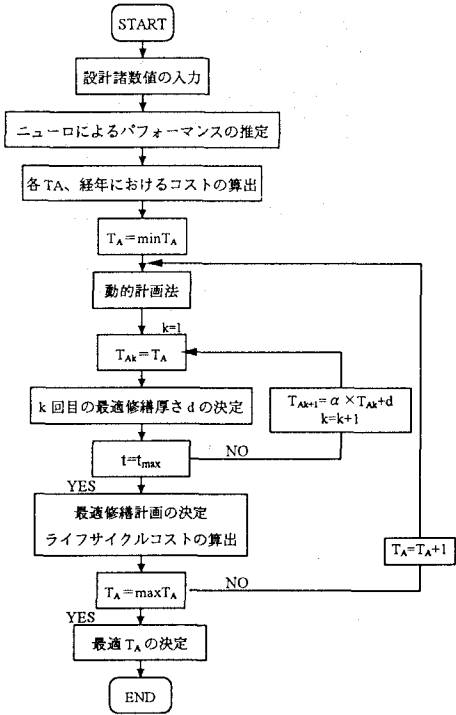


図-4 フローチャート

表-1 各交通条件における交通量

交通区分	全交通量 (台/日・車線)	大型車交通量 (台/日・車線)
B 交通	5000	600
C 交通	9000	2000
D 交通	13000	3000

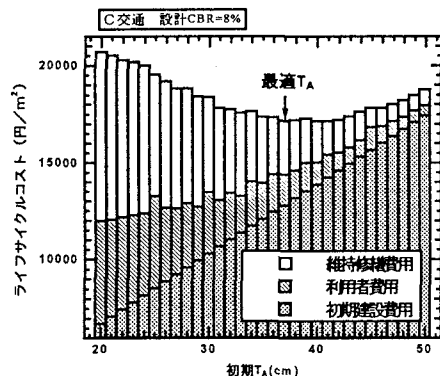


図-5 T_A と各費用の関係

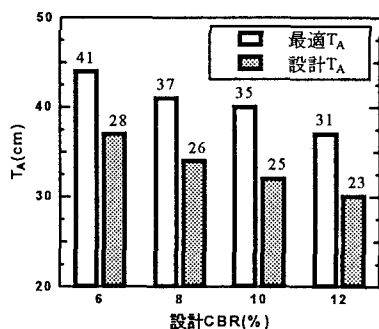


図-6 設計 CBR ごとの最適 T_A (C 交通)

ものである。初期 T_A が小さくなると初期建設費用は小さいが、維持修繕費用、利用者費用は大きくなる。そのために、ライフサイクルコストは大きくなり経済的ではない。逆に大きな初期 T_A では初期建設費用が大きくなり、これもまたライフサイクルコストは大きくなる。すなわち、合理的な舗装の初期設計を行うためには、舗装の機能が存続している期間に発生する総費用、つまりライフサイクルコストを考慮して設計を行う必要がある。この場合はライフサイクルコストが最小となる $T_A=35$ が最適 T_A である³⁾。

図-6 はアスファルト舗装要綱による設計 T_A ⁹⁾ と本研究による最適 T_A について、C 交通、解析期間 30 年の場合に、設計 CBR に関して求めたものである。これらの最適 T_A 値は設計 T_A よりも大きい。すなわち、東北地方において舗装の設計を行う場合には、アスファルト舗装要綱による設計 T_A では過小であることがわかる。

(5) 最適修繕工法

図-7 は、C 交通、設計 CBR10%、解析期間 30 年の場合に、初期 T_A とそのときに採用された修繕工法を示したものである。このような初期 T_A と修繕工法の組み合わせにおいて、ライフサイクルコストが最小となる場合の修繕厚さを最適修繕工法と定義する。図-7 において、最適 T_A を 37 とした場合には、この最適修繕工法は 1 回目の修繕で 7cm のオーバーレイ、2 回目の修繕で 3cm のオーバーレイとなる。

図-8 はこの最適修繕工法を、解析期間 30 年、設計 CBR=8% の場合について、交通条件に関して求めたものである。

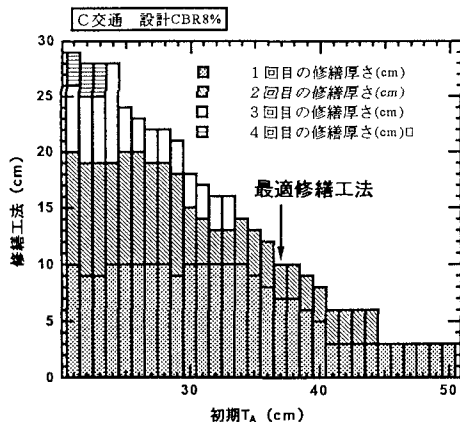


図-7 T_A と修繕工法の関係

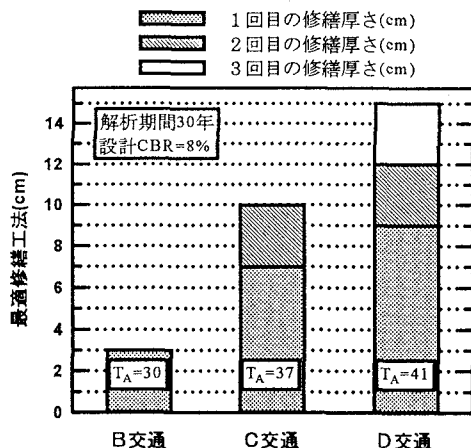


図-8 交通条件による最適修繕工法

損傷の進行が遅いB交通においては薄いオーバーレイが採用されている。また損傷の進行が早い、C交通、D交通においては厚いオーバーレイが採用されている。すなわち、最適な道路管理を行うためには、一般に標準とされている5cmのオーバーレイでは、交通量の多い道路においては過小であるが、逆に、交通量の少ない道路においては修繕厚さが過大ということが示されている。

また、最適修繕工法が解析期間によってどのような影響を受けるかを、C交通、設計CBR=8%の場合について解析した。その結果は図-9に示すとおりである。解析期間が長くなると厚いオーバーレイが最適修繕工法となるが、解析期間が短くなると薄いオーバーレイが最適修繕工法となる。これは厚いオーバーレイを施工した舗装は、ある管理水準を保って長い年数を供用することができるので、解析期間が長いと維持管理費用の面で有利となるためである。

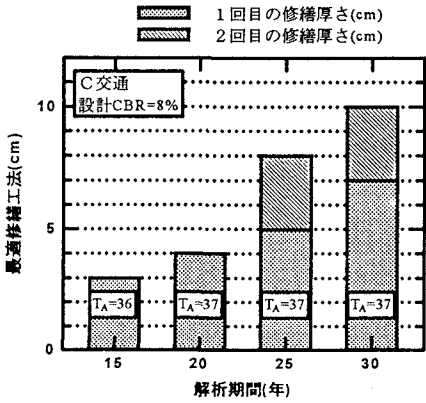


図-9 解析期間による最適修繕工法

4. 既存のシステムとの比較

(1) 初期 T_A によるライフサイクルコストの変化

舗装管理におけるランキング型システムとは、舗装の供用性指標を用いてある管理水準を設け、この管理水準に基づいて修繕を行うシステムである。今回はこの管理水準を、建設省が修繕の管理水準とする $MCI=3.0 \sim 5.0$ の平均値の $MCI=4.0$ と設定した。また、この場合の修繕工法は5cmのオーバーレイのみとする。

このランキング型システムと2種類の動的計画法による最適化システムを用いて、次に示す3通りの場合について、ライフサイクルコスト解析の比較を行う。設計条件は、解析期間30年、設計CBR=8%、C交通とする。舗装要綱による設計 T_A を用いて初期設計を行い、ランキング型システムで修繕計画を求めた場合(ケース1)、単工法を採用し、最適化システムで求めた最適 T_A で初期設計を行った場合(ケース2)、複数工法を採用し、最適化システムで求めた最適 T_A で初期設計を行った場合(ケース3)とする。

これらの解析結果は図-10、図-11のようになる。図-10は各ケースの修繕計画の違いをMCIの推移で示したものであり、図-11はそれぞれのケースの場合のライフサイクルコストを示したものである。各ケースにおいて、ケース3の場合が最も経済的である。ケース1においては、初期 T_A が不足しているため他の場合より修繕回数が多くなる。その結果、初期建設費用は小さいが利用者費用及び維持修繕費用が大きくなり、ライフサイクルコストは大きくなる。

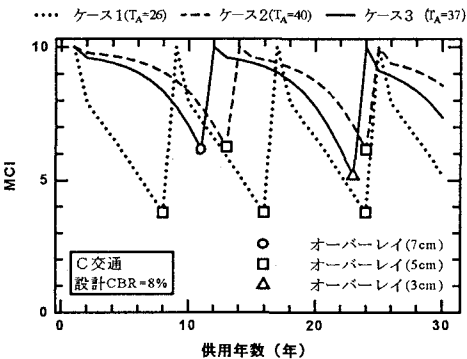


図-10 修繕計画の比較

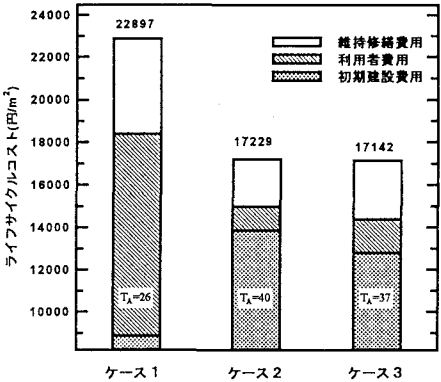


図-11 各費用の比較

また、ケース2とケース3を比較すると、ライフサイクルコストの差はわずかであるが、修繕工法も最適化したケース3の方が小さい初期 T_A で最適に管理することができる。つまり、初期投資をケース2の場合と比べて少なくすることができる。また、最適化システムにおける修繕時点でのMCIはランキング型システムの修繕時点でのMCIよりも良好な状態になる。つまり、最適化システムの方が路面の性状を良好な水準に保ちながら経済的な修繕管理を行うことができる。

(2) 解析期間によるライフサイクルコストの変化

舗装要綱の設計 T_A で初期設計を行い、ランキング型システム、最適化システム（単一工法）、最適化システム（複

数工法）の3種類のシステムで修繕計画の最適化を行う。そして、解析期間を延長させた場合のライフサイクルコストを解析した。ここで解析条件は、設計CBR=8%、C交通、 $T_A=26$ とする。解析結果は図-12に示すとおりである。

ランキング型システムでは、解析期間の増加に伴ってライフサイクルコストが階段状に増加しているが、任意の修繕工法を考慮した最適化システムの場合では、ライフサイクルコストの増加が滑らかである。その結果として、わずかな解析期間の増加に伴うライフサイクルコストの増加を軽減することができる。すなわち、解析期間の設定如何にかかわらずライフサイクルコストを小さくして、最適な舗装の修繕計画を決定することができる。

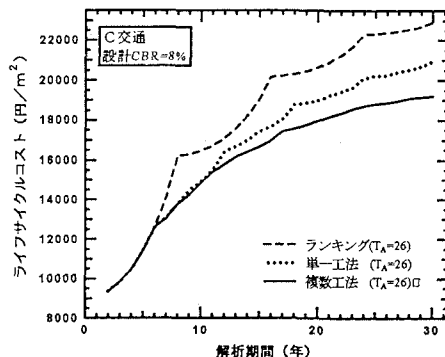


図-12 解析期間によるライフサイクルコストの変化

5. むすび

舗装管理システムの中核機能は、舗装の路面性状の遷移を示すパフォーマンスモデルと、舗装の管理費用を最小にする修繕計画を決定する最適化手法によって構成される。

本研究においては、パフォーマンスモデルとして地域毎に異なる路面性状特性を考慮したニューロパフォーマンスモデルを用いた。また、最適化手法として動的計画法を用いて、修繕計画、及び修繕舗装厚さを最適化するシステムを構築した。

この最適化システムにより、舗装のライフサイクルコストを最小とする舗装の初期設計を決定することができる。本システムの特徴は、修繕計画及び修繕工法（オーバーレイ厚）の両者を舗装のライフサイクルにおいて最適化することにある。この結果として、交通条件や解析期間のような設計条件に応じた柔軟性の高い修繕政策の決定を行うことができる。

参考文献

- 1)堀木賢一，福田正：ニューラルネットワークによる舗装のパフォーマンスモデル，土木学会論文集，NO.496、p99-102，1994.
- 2)水野直樹，福井康裕，松井邦人，井上武美：アスファルト舗装を対象とした維持管理支援システムの開発，土木学会論文集，NO.409/IV-11，pp93-101，1989.
- 3)孔永健，福田正：動的計画法に基づくアスファルト舗装の最適設計，土木学会論文集，NO.502/V-25，1994.
- 4)武山泰，嶋田洋一，福田正：マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム，土木学会論文集，NO.420/V-13，pp135-141，1990.
- 5)堀木賢一，福田正：ニューロパフォーマンスモデルを用いたプロジェクト型舗装管理システム，土木学会論文集，NO.520，p195-201，1995.
- 6)Kieran J.Feighan，Mohamed Y.Shahin，Kumares C. Shiha，Thomas D.White：Application of Dynamic Programming and Other Mathematical Techniques to Pavement Management Systems：Transportation Research Record，NO 1200，1988.
- 7)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.
- 8)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.
- 9)日本道路協会，アスファルト舗装要綱，1992.