

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

AN EVALUATION SYSTEM FOR MANAGING ASPHALT PAVEMENTS BASED ON MARKOV CHAIN MODEL

武山 泰*・嶋田 洋一**・福田 正***

By Yasushi TAKEYAMA, Yoichi SHIMADA and Tadashi FUKUDA

The object of this study is to develop an evaluation system for managing asphalt pavements based on Markov chain model. Deterioration process, reliability, effects of rehabilitation, and steady state probability of asphalt pavements can be evaluated by this system. In this paper, the Markov chain model methodology is explained, and the application of this system to actual asphalt pavements in Tohoku district is described. As the results, transition matrices for asphalt pavement performance are obtained, and the effects of rehabilitation are estimated quantitatively by this system.

Keywords : asphalt pavement, pavement management system, Markov chain model

1. ま え が き

舗装の維持管理を合理的かつ経済的に行うために、近年、舗装管理システム (Pavement Management System) の重要性が指摘されている。このためには、舗装の交通供用に伴う破損量の推移を、適切に予測あるいは評価するサブシステムが必要であるが、舗装特にアスファルト舗装の場合、その挙動の変動が一般に大きいことなどから適切な評価システムの構築が難しく、このことが舗装管理システムの普及を遅らせている理由の1つであると考えられる。そこで本研究は、アスファルト舗装の破損量のデータに、マルコフ連鎖モデルを適用することにより、アスファルト舗装の挙動の変動特性を考慮した評価システムを構築しようとするものである。

舗装問題に関してマルコフ連鎖モデルを適用した研究事例としては、A.C. Lemer *et al.*¹⁾、B.F. McCullough²⁾ らが、アスファルト舗装の寿命期間内における状態遷移、すなわち、徐々に破損が進行する状態、急速に進行する状態、補修、終局的破損の4状態間の遷移関係に、マルコフ連鎖モデルを適用して、舗装の信頼性を論じたのが

端緒であろう。一方、最近の研究として、K.J. Feighan *et al.*³⁾、W.D. Cook *et al.*⁴⁾、J.V. Carnahan *et al.*⁵⁾らはマルコフ連鎖モデルによって舗装の挙動推移モデルを構築し、アスファルト舗装の補修計画のシステム化を試みている。

マルコフ連鎖モデルによる舗装の挙動推移モデルの特徴は、これらの研究でも指摘されているように、回帰モデル式の場合と異なって舗装挙動の変動特性を表現できることにあるが、これらの研究では、その実用化のためのアルゴリズムが必ずしも確立されていない。そこで、本研究においては、東北地方の国道の舗装路面性状調査のデータを事例に、交通供用に伴う舗装破損の推移、その信頼性確率、さらに補修を実施した場合の効果などを評価できる実用的システムを、マルコフ連鎖モデルを用いて構築することを目的とした。

2. マルコフ連鎖モデル

(1) 基本モデル⁶⁾

舗装は、舗設直後の良好な状態から、交通、気象などの条件により徐々に損傷を受け、破損に至る。いま、舗装の状態をいくつかのランクに分けて評価を行うことを考える。この場合、ある状態から他の状態への遷移は、それ以前の舗装の履歴に依存するものと考えられるが、ここでは、直前の舗装の状態のみに関係するものと仮定し、破損の過程を離散パラメーターの1様マルコフ連鎖

* 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 学生会員 東北大学大学院工学研究科 前期課程在学
(同上)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(同上)

によりモデル化する。

舗装の状態を良好な状態のランク1から、終局的破損状態のランク n までの n 段階のランクで評価する。ここで、状態の変化は離散的な時間、 $t_1, t_2(=t_1+\Delta t), \dots$ において生じるものとする。時間 t における舗装の状態を X_t とするとき、時間 t でランク i の舗装が、時間 $t+\Delta t$ でランク j に移行する遷移確率 p_{ij} は次式で表わされる。

$$p_{ij} = Prob[X_{t+\Delta t} = j | X_t = i] \dots\dots\dots (1)$$

この遷移確率が、舗装の現在の状態のみに関係すると仮定するならば、 p_{ij} は時間差 Δt にのみ依存することになる。舗装状態のランクの各組に対する遷移確率を、マトリックス表示すると次のようになる。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $0 \leq p_{ij} \leq 1$

ここで個々の遷移状態は互いに排反であり、かつすべての状態を表わすことから、各行の要素の和は1となる。すなわち、

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \dots\dots\dots (3)$$

n 個の状態をもつマルコフ連鎖において、その初期状態は、次の行ベクトルで与えられる状態確率で表わされる。

$$X(0) = [x_1(0) \quad x_2(0) \quad \dots \quad x_n(0)] \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $x_i(0)$: 舗装が初期状態においてランク i である確率

同様に、 $1, 2, \dots, m$ ステップ後における状態確率 $X(1), X(2), \dots, X(m)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} X(1) &= X(0)P \\ X(2) &= X(1)P = X(0)P^2 \dots\dots\dots (5) \\ \vdots \\ X(m) &= X(m-1)P = \dots = X(0)P^m \end{aligned}$$

これらの遷移確率と状態確率により、舗装の交通供用に伴う挙動変化を表現することができる。

(2) 信頼性および供用寿命の評価

補修がまったく行われない舗装の場合、その状態が以前の状態よりも良好な状態に回復することはあり得ないことから、 $j < i$ については $p_{ij} = 0$ 、そして $p_{nn} = 1$ であり、遷移確率マトリックスは上三角行列となる。また、終局的破損状態のランク n に達した舗装は他の状態に遷移することはなく、ランク n はマルコフ連鎖における吸収

状態である。

m ステップ後の状態確率は式(5)の $X(m)$ で与えられる。これより、良好な状態にある舗装が m ステップ後に終局的破損状態に至らない確率、すなわち信頼性確率は次式により与えられる。

$$R(m) = 1 - x_n(m) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $R(m)$: m ステップ後の舗装の信頼性確率
 $x_n(m)$: m ステップ後に舗装がランク n にある確率であり、式(5)において初期状態確率を $X(0) = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$ とすることにより得られる

次に、初期状態においてランク i の舗装が吸収されるまでにランク j にとどまる平均ステップ数を m_{ij} とする。このとき、初期状態から1ステップ後にランク k に遷移し、その後にはランク j にとどまるステップ数を考慮することにより、遷移確率 p_{ij} を用いて、 m_{ij} に関する次の連立方程式を導くことができる。

$$\begin{aligned} m_{ij} &= E[\text{ランク } j \text{ での滞留ステップ数} | X_0 = i] \\ &= \sum_{k=1}^n E[\text{ランク } j \text{ での滞留ステップ数} | X_0 = i, X_1 = k] \\ &\quad \cdot Prob(X_1 = k | X_0 = i) \\ &= \sum_{k=1}^n \{\delta_{ij} + E[\text{ランク } j \text{ での滞留ステップ数} | X_0 = k]\} \\ &\quad \cdot p_{ik} \\ &= \delta_{ij} + \sum_{k=1}^n m_{kj} \cdot p_{ik} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで、 δ_{ij} は Kronecker のデルタであり、次式で定義される。

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

吸収状態 n については、 $m_{in} = m_{nj} = 0$ であるから、 m_{ij} に関する連立方程式は、 $i \leq n-1, j \leq n-1$ の範囲について考慮すればよい。この連立方程式を行列表示すると次のようになる。

$$M = I + P'M \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 M : 平均滞留ステップ数のマトリックス
 I : $(n-1)$ 次の単位マトリックス
 P' : 遷移確率マトリックスから n 行および n 列を削除した $(n-1)$ 次の正方行列

これより、平均滞留ステップ数のマトリックス M は次式により求められる。

$$M = [I - P']^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

マトリックス M の要素 m_{ij} は、初期状態がランク i である舗装が、終局的破損状態に至るまでにランク j に滞留する平均ステップ数であり、各行の要素の和は、そ

それぞれの初期状態の舗装が終局的破損状態に至るまでの平均ステップ数を表わす。このことから、初期状態がランク1である舗装の平均吸収ステップ数を求めて、新設の舗装の平均供用寿命を評価することができる。

(3) 補修を考慮した遷移確率マトリックス

補修を行う場合については、補修により舗装は以前の状態よりも良好な状態に遷移することから、 $j < i$ についても、 $p_{ij} > 0$ となる要素が現われ、また、 $p_{nn} < 1$ となり、このマルコフ連鎖は吸収状態をもたないことになる。

ランク*i*の舗装に対して、そのステップ期間に r_i の比率で補修を実施する場合を考える。このとき、補修が行われる確率は次の列ベクトルにより与えられる。

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = {}^t[r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n] \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $0 \leq r_i \leq 1$

t : 転置を表わす記号

また、この補修により舗装が次のステップにおいてランク*j*に遷移する確率 f_j を用いて、補修の効果を評価することができる。 Δt のステップ期間において任意の時間に補修が行われることを考慮すると、次のステップまでに平均的には $\Delta t/2$ の時間が経過し、この間の交通供用により舗装は損傷を受けることになる。このため、補修が行われても次のステップにおいて、必ずしもすべての舗装がランク1に遷移するとは限らない。この場合、補修効果は次の行ベクトルにより与えられる。

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n] \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $0 \leq f_j \leq 1, \sum_{j=1}^n f_j = 1$

これらの補修が行われる確率およびその効果による遷移確率を考慮に入れた遷移確率マトリックス P' の各要素 p'_{ij} は、次のようになる。

$$p'_{ij} = p_{ij} \cdot (1 - r_i) + r_i \cdot f_j \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 p_{ij} : 補修が行われない場合の遷移確率マトリックス P の各要素

何種類かの補修工法が採られ、おのおのの頻度および効果が異なる場合にも、各工法の補修確率とその効果による遷移確率を考慮することにより遷移確率マトリックスを導くことができる。 L 種類の工法が用いられる場合については、次式のようになる。

$$p'_{ij} = p_{ij} \cdot (1 - \sum_{k=1}^L r_{ik}) + \sum_{k=1}^L r_{ik} \cdot f_{kj} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 r_{ik} : ランク*i*の舗装に対して補修*k*を実施する確率。ただし、 $\sum_{k=1}^L r_{ik} \leq 1$

f_{kj} : 補修*k*が行われた舗装が次のステップで

ランク*j*に遷移する確率

このとき舗装全体に対して行われる補修*k*の比率は、状態確率ベクトルと補修確率ベクトルを用い、次式により求めることができる。

$$R_k = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] {}^t[r_{1k} \ r_{2k} \ \dots \ r_{nk}] = X r_k \dots\dots\dots (15)$$

(4) 定常状態確率

エルゴード的マルコフ連鎖においては、状態確率は初期状態確率から独立である定常状態確率 X^* に収束し、次式が成立する。

$$X^* = X^* P \dots\dots\dots (16)$$

式(16)から次の連立方程式が得られる。

$$[x_1^* \ \dots \ x_n^*] = [x_1^* \ \dots \ x_n^*] \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 x_i^* : 定常状態においてランク*i*の舗装が占める確率

式(17)は1次の自由度をもち、次の拘束条件のもとで解くことにより、定常状態確率を求めることができる。

$$x_1^* + x_2^* + \dots + x_n^* = 1 \dots\dots\dots (18)$$

拘束条件を考慮に入れると、

$$[x_1^* \ \dots \ x_n^*] = [x_1^* \ \dots \ x_n^*] \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1n} - 1 \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & \dots & p_{nn} - 1 \end{bmatrix} + [0 \ \dots \ 0 \ 1] \dots\dots\dots (19)$$

これを行列表示すると、

$$X^* = X^* Q + T \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 Q : 遷移確率マトリックスの n 列の要素から1を差し引いたマトリックス

T : n 番目の要素の値が1で他の要素の値が0である n 次の行ベクトル

式(20)により、定常状態確率ベクトル X^* は、次式により与えられる。

$$X^* = T [I - Q]^{-1} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 I : n 次の単位マトリックス

式(21)により、定常状態で状態確率が求めれば、各ランクに対する補修確率から、定常状態における年間必要補修量を求めることができる。

3. 適用事例

(1) データファイル

本研究では、建設省東北地方建設局の路面性状調査のデータを使用した。この調査では、東北地方建設局管内の一般国道を対象に、ひびわれ率、わだちばれ深さ、および縦断凹凸量が測定されている。調査は、キロポストを基準に延長100mの区間を1地点として、同一地点については3～4年に1回の割合で行われている。

路面性状調査で得られたデータは、舗設年および調査前の最新3回までの補修に関する補修年・補修工法等のデータとともに磁気テープに収録されている。これらのデータについて、各地点の起・終点のキロポスト、車線(上り・下り)、舗設年、路面種別の一致するデータを同一地点のデータとして結合し、さらに、昭和60年道路交通センサスから得られる交通区分のデータを補い、データファイルを作成した。

データの中には、路面種別がアスファルトと記載されているにもかかわらず、コンクリート舗装をアスファルトでオーバーレイした地点や、トンネル・橋梁等の構造物区間、また、構造物前後の延長が100mに満たない区間のデータも含まれている。本研究では、これらのデータを除外し、最新調査時点において路面種別がアスファルトである延長50m以上の土工区間のうち、舗設時にアスファルト舗装で施工された、10450地点のデータを分析の対象とした。

アスファルト舗装の供用成績は厳密には構造条件、地域的な環境条件、交通条件等の影響を受ける。しかし、分析において大量のデータを必要とすること、および東

北地方のアスファルト舗装の破損の主要な要因が冬期のスパイクタイヤによる摩耗であることから、舗装の構造条件、環境条件の影響については今回の分析では考慮せず、スパイクタイヤ装着状況が異なる国道6号を除いたデータを、交通区分別に取り扱うことにした。

舗装の供用性指標として道路維持修繕要綱⁷⁾に示されるPSIを用いた。これは次式により表わされる。

$$PSI=4.53-0.518 \log \sigma-0.371\sqrt{C}-0.174D^2 \dots (22)$$

ここで、 σ ：縦断方向の凹凸の標準偏差(mm)

C ：ひびわれ率(%)

D ：わだちばれ深さの平均(cm)

このPSIを用いて、維持修繕要綱に示されている対応工法との関係等を参考として、舗装の状態を表-1に示す5段階のランクで評価することとした。

図-1に、各年度における、データファイルの舗装の状態(ランク)の占める割合、および各工法ごとの補修の占める比率を示す。

昭和59～61年度の調査データから、各交通区分ごとに求めた舗装の状態確率をベクトル表示すると、表-2のようになる。これらは、それぞれの道路における舗装の定常状態確率と考えられる。

表-1 舗装の状態の評価

ランク	PSI	対応工法 ⁷⁾
1	4～	—
2	3～4	—
3	2～3	表面処理
4	1～2	オーバーレイ
5	～1	打換え

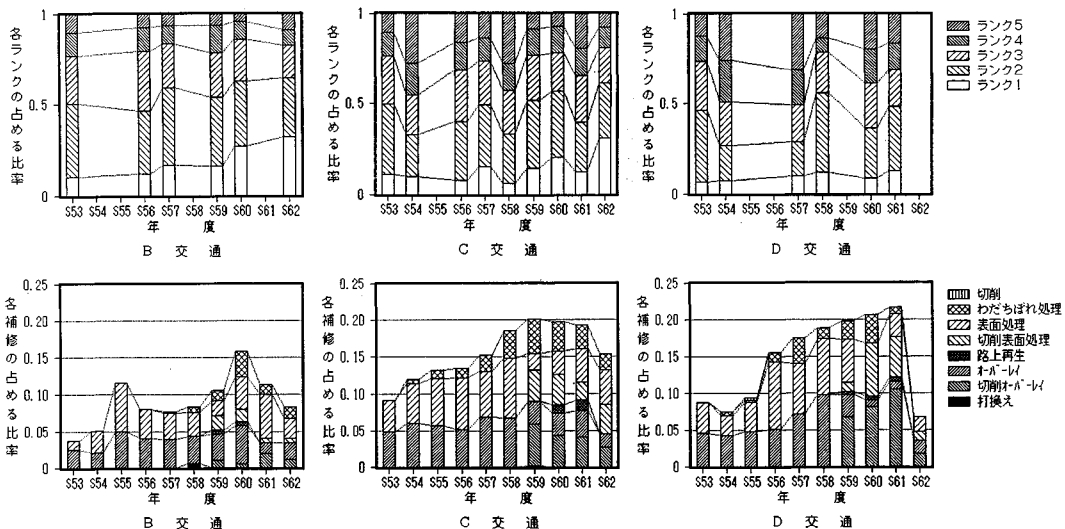


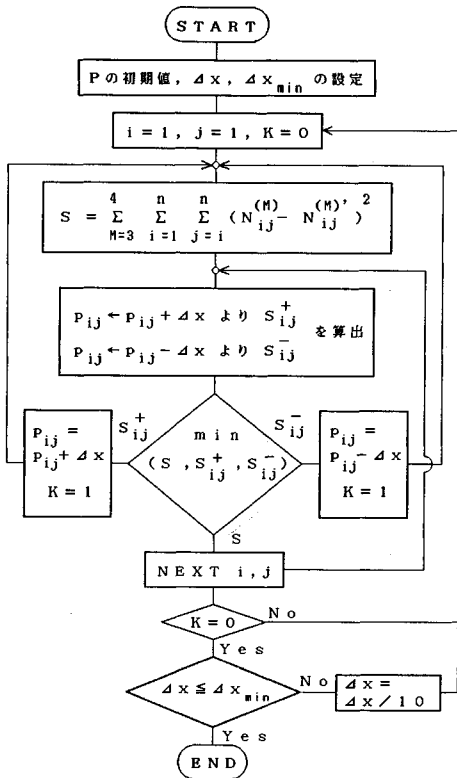
図-1 舗装の状態および補修の占める比率

表一 2 現況における舗装の状態確率

B交通	X = [0.230 0.359 0.242 0.120 0.049]
C交通	X = [0.157 0.334 0.244 0.149 0.115]
D交通	X = [0.114 0.320 0.221 0.170 0.175]

表一 3 補修が行われた比率

交通区分	B交通	C交通	D交通
補修工法			
オーバーレイ	0.0499	0.0887	0.1067
表面処理	0.0756	0.1075	0.1001
計	0.1255	0.1962	0.2068



図一 2 1年間の遷移確率マトリックスを求めるフローチャート

ここで、補修工法のうち、切削オーバーレイ、オーバーレイ、路上再生を「オーバーレイ」とし、切削表面処理、表面処理、わだちばれ処理、切削を「表面処理」として整理した場合、昭和59～61年度の平均による、舗装全体に対して補修が行われた比率は、表一3に示すとおりである。

(2) 遷移確率マトリックス

本研究で用いたデータは調査間隔が3年または4年のデータであるので、これを1年間の遷移確率マトリク

表一 4 1年間の遷移確率マトリックス

B交通	$\begin{bmatrix} 0.601 & 0.399 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.753 & 0.247 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.769 & 0.214 & 0.017 \\ 0 & 0 & 0 & 0.755 & 0.245 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
C交通	$\begin{bmatrix} 0.310 & 0.550 & 0.130 & 0.010 & 0 \\ 0 & 0.562 & 0.371 & 0.022 & 0.045 \\ 0 & 0 & 0.610 & 0.380 & 0.010 \\ 0 & 0 & 0 & 0.595 & 0.405 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
D交通	$\begin{bmatrix} 0.349 & 0.621 & 0 & 0.030 & 0 \\ 0 & 0.276 & 0.425 & 0.299 & 0 \\ 0 & 0 & 0.509 & 0.355 & 0.136 \\ 0 & 0 & 0 & 0.530 & 0.470 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

スに次の方法で変換した。ここで、マルコフ連鎖における1ステップの期間を1年間としたのは、道路の維持修繕計画が一般に年度ごとに行われること、また、アスファルト舗装の破損に大きく影響する1年間の季節変動を考慮したものである。

複数年の期間に対する状態遷移の度数から、1年間の遷移確率マトリックスを求める手法のフローチャートを図一2に示す。この手法は式(5)に基づくもので、まず遷移確率マトリックスPの初期値を与え、補修が行われなかった場合のデータのM年間の遷移度数のマトリックスN^(M)の各行の和を、PのM乗のマトリックスにより各行各列ごとに割り振り、推定される遷移度数のマトリックスN^(MY)を作成する。そして、Pの各要素を式(3)の条件を満足させながら微小量ずつ変化させ、N^(M)とN^(MY)の各要素の差の二乗和が最小となるマトリックスを繰り返し計算により求め、これを1年間の遷移確率マトリックスとした。

ここで、M年間の遷移度数のマトリックスN^(M)は、次のとおりである。

$$N^{(M)} = \begin{bmatrix} N_{11}^{(M)} & N_{12}^{(M)} & \dots & N_{1n}^{(M)} \\ N_{21}^{(M)} & N_{22}^{(M)} & \dots & N_{2n}^{(M)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{n1}^{(M)} & N_{n2}^{(M)} & \dots & N_{nn}^{(M)} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (23)$$

ここで、N_ij^(M)：ランクiの舗装がM年後にランクjに遷移した度数

交通区分別に得られた遷移確率を、マトリックス表示すると表一4のようになる。

(3) 舗装の信頼性

式(5)から、1年間の遷移確率マトリックスをm乗することにより、m年経過後の遷移確率を求めることがで

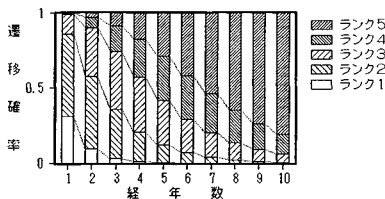
きるが、ランク5すなわち舗装の終局的破損状態に至らない確率により舗装の信頼性を評価することができる。

良好な状態（ランク1）にある舗装の、経年数5年および10年における信頼性確率は式(6)より $R(5)$ および $R(10)$ により求められ、その結果は表一5のとおりとなる。

また、一例としてC交通における、舗装が良好な状態から徐々に供用性が低下していく10年間の遷移確率の経年変化を図一3に示す。

表一5 舗装の信頼性確率

交通区分	経年数	5年	10年
B交通		0.970	0.706
C交通		0.710	0.190
D交通		0.468	0.046



図一3 C交通における遷移確率の経年変化

(4) 供用寿命の期待値

式(10)を用いて、舗装が終局的破損状態に至るまでに各ランクに滞留する年数の期待値、および終局的破損状態に至るまでの年数の期待値を計算した結果を表一6に示す。良好な状態にある舗装では平均供用寿命はB交通で約15年、C交通では約8年、D交通で約6年であることになる。

表一6 舗装の供用寿命

B交通	$\begin{bmatrix} 2.51 & 4.05 & 4.33 & 3.77 \\ 0 & 4.05 & 4.33 & 3.77 \\ 0 & 0 & 4.33 & 3.77 \\ 0 & 0 & 0 & 4.08 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 14.66 \\ 12.15 \\ 8.10 \\ 4.08 \end{bmatrix}$	(年)
C交通	$\begin{bmatrix} 1.45 & 1.82 & 2.22 & 2.21 \\ 0 & 2.28 & 2.18 & 2.16 \\ 0 & 0 & 2.57 & 2.41 \\ 0 & 0 & 0 & 2.47 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.70 \\ 6.62 \\ 4.98 \\ 2.47 \end{bmatrix}$	(年)
D交通	$\begin{bmatrix} 1.54 & 1.32 & 1.14 & 1.80 \\ 0 & 1.38 & 1.20 & 1.78 \\ 0 & 0 & 2.04 & 1.54 \\ 0 & 0 & 0 & 2.13 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5.80 \\ 4.36 \\ 3.58 \\ 2.13 \end{bmatrix}$	(年)

(5) 補修効果

前項までは補修を行わない状態を前提として分析を行ってきたが、実際の舗装は破損がある程度進行すると補修が行われ、快適な走行性を保つように管理されてい

る。そこで、ここでは破損によって補修が繰り返された際の定常確率を求める。補修を行わない場合、遷移確率マトリックス P は、2.(2)で述べたように、次式で表わされる。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 $0 \leq p_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^5 p_{ij} = 1$

補修工法として、 L 種類の補修工法があり、ランク i の舗装に対して r_{ik} の確率で補修 k が実施され、次のステップにおいてランク j に f_{kj} の確率で遷移する場合、その遷移確率マトリックス P' の各要素 p'_{ij} は式(14)により与えられる。本研究では、補修工法をオーバーレイと表面処理の2種類に大別し、各交通区分ごとに各補修工法の効果を評価した。

補修確率については、まず調査が行われた年度の次年度に補修が行われた地点のデータを集計し、各補修工法ごとに補修が行われた1年前の舗装のランクの比率を求めた。次にこの比率を用いて、表一3に示される各補修が行われた比率を舗装の各ランクに割り振り、さらに、表一2の舗装の状態確率との比をとることにより、現況における各ランクに対する補修確率を推定した。得られた補修確率 r_{ik} を表一7に示す。

補修効果は、各補修が行われた年度の次年度に、舗装がどのランクに遷移したかを集計し、補修が行われた場合の遷移確率として表わすことによりその効果を評価した。得られた補修効果を表一8、および、図一4に示す。これによれば、オーバーレイの補修効果は表面処理よりもかなり大きいこと、また重交通ほど補修効果が小さい

表一7 補修確率

交通区分	ランク i					
	工法 k	1	2	3	4	5
B	オーバーレイ	0.003	0.022	0.078	0.101	0.203
	表面処理	0.005	0.057	0.117	0.131	0.209
C	オーバーレイ	0.005	0.034	0.075	0.138	0.325
	表面処理	0.008	0.050	0.127	0.177	0.278
D	オーバーレイ	0.018	0.025	0.059	0.194	0.453
	表面処理	0.004	0.013	0.117	0.172	0.355

表一8 補修効果

交通区分	ランク i					
	工法 k	1	2	3	4	5
B	オーバーレイ	0.773	0.227	0.000	0.000	0.000
	表面処理	0.551	0.381	0.051	0.017	0.000
C	オーバーレイ	0.534	0.417	0.040	0.004	0.004
	表面処理	0.395	0.462	0.103	0.024	0.015
D	オーバーレイ	0.240	0.451	0.240	0.051	0.017
	表面処理	0.145	0.591	0.199	0.054	0.011

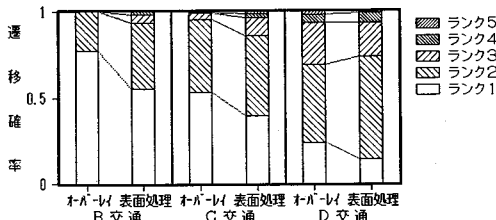


図-4 補修効果

表-9 補修実績を考慮した遷移確率マトリックス

B交通

$$\begin{bmatrix} 0.601 & 0.399 & 0 & 0 & 0 \\ 0.049 & 0.720 & 0.230 & 0.001 & 0 \\ 0.125 & 0.062 & 0.625 & 0.174 & 0.014 \\ 0.150 & 0.073 & 0.007 & 0.582 & 0.188 \\ 0.271 & 0.126 & 0.011 & 0.004 & 0.588 \end{bmatrix}$$

C交通

$$\begin{bmatrix} 0.312 & 0.549 & 0.129 & 0.010 & 0 \\ 0.038 & 0.552 & 0.347 & 0.021 & 0.042 \\ 0.091 & 0.090 & 0.503 & 0.306 & 0.010 \\ 0.144 & 0.140 & 0.024 & 0.412 & 0.280 \\ 0.284 & 0.264 & 0.042 & 0.008 & 0.402 \end{bmatrix}$$

D交通

$$\begin{bmatrix} 0.346 & 0.618 & 0.005 & 0.031 & 0 \\ 0.008 & 0.285 & 0.416 & 0.290 & 0.001 \\ 0.031 & 0.096 & 0.458 & 0.301 & 0.114 \\ 0.072 & 0.189 & 0.081 & 0.355 & 0.303 \\ 0.160 & 0.415 & 0.179 & 0.042 & 0.204 \end{bmatrix}$$

表-10 遷移確率 P' から求めた定常状態確率

B交通	$X^*=[0.202$	0.393	0.245	0.104	$0.056]$
C交通	$X^*=[0.131$	0.327	0.279	0.160	$0.103]$
D交通	$X^*=[0.078$	0.252	0.277	0.256	$0.137]$

ことがわかる。

これらの補修実績を考慮すると、遷移確率マトリックス P' は、表-9 のようになる。

また、遷移確率 P' から式(21)を用いて定常状態確率ベクトル X^* を求めると、表-10 のようになる。

この値は表-2 の現況における舗装の状態確率にはほぼ近似値を示しており、本研究において行った、補修が行われない場合および補修を考慮した場合の遷移確率マトリックスの分析が妥当なものであることを示している。

4. む す び

近年、道路舗装は新設のための技術から、その維持管理の技術がより重視される時代になってきている。舗装路面を快適な状態でかつ経済的に管理するためには、交通供用に伴う舗装の挙動の推移を適切に予測し、その特

性を分析し評価するシステムが必要である。

本研究においては、マルコフ連鎖モデルを用いて、アスファルト舗装の破損遷移を表現し、アスファルト舗装に固有する挙動のばらつきから、その供用寿命に対する信頼性を評価することを試みた。さらに、マルコフ確率論のアルゴリズムを広範に適用することによって、アスファルト舗装の補修の効果、定常状態における舗装の路面状態などの評価方法を示した。これらの一連の成果は、アスファルト舗装の補修工法、その時期などを選択する際の有力な情報になろう。

なお、今後はさらに舗装構造条件、交通条件等についてデータファイルを充実させ、経済性分析なども含めて、より実用的な評価システムを構築することが課題として残されている。

謝 辞：本研究において、貴重なデータを提供していただきました建設省東北地方建設局東北技術事務所に対して、厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Lemer, A.C. and Moavenzadeh, M.: Reliability of Highway Pavements, Highway Research Record 362, pp. 1~8, 1971.
- 2) McCullough, B.F.: State of the Art in Predicting the Probabilistic Response of Pavement Structures, Transportation Research Record 757, pp. 17~26, 1976.
- 3) Feighan, K.J., Shahin, M.Y. and Sinha, K.C.: A Dynamic Programming Approach to Optimization for Pavement Management Systems, Proceedings of Second North American Conference on Managing Pavements, Vol. 2, pp. 195~206, 1987.
- 4) Cook, W.D. and Kazako, A.: Pavement Performance Prediction & Risk Modelling in Rehabilitation Budget Planning: A Markov Approach, Proceedings of Second North American Conference on Managing Pavements, Vol. 2, pp. 63~75, 1987.
- 5) Carnahan, J.V., Davis, W.J., Shahin, M.Y., Keane, P. L. and Wu, M.I.: Optimal Maintenance Decisions for Pavement Management, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 554~572, 1987.
- 6) Ang, A.H-S. and Tang, W.H.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II-Decision, Risk, and Reliability, John Wiley & Sons, Inc., pp. 112~140, 1984.
- 7) 日本道路協会：道路維持修繕要綱, 1978.

(1989.10.25・受付)