

ネットワークレベル舗装修繕計画の最適化

孔 永健¹・福田 正²

¹学生員 工修 東北大学大学院情報科学研究科博士課程 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²正会員 工博 東北大学大学院情報科学研究科教授 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

動的計画法を適用したネットワークレベル舗装管理システムを構築した。このシステムを用いることによって、解析期間における修繕のための総予算が与えられた場合の、ネットワーク（道路区間群）のトータルライフサイクルコストを最小にする舗装の修繕計画を決定することができる。

Key Words: network level pavement management system, dynamic programming, life cycle cost, optimal repair program

2. ネットワークレベル舗装管理システム

1. はじめに

舗装管理システムには、プロジェクトレベルとネットワークレベルがある。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。これに対してネットワーク（Network）とは、二つ以上のプロジェクトより構成される道路区間群である。すなわち、プロジェクトレベル舗装管理システムでは、新設される道路区間の舗装構造と、これの解析期間における修繕の時期、工法の決定などを最適化の目的としている。一方で、ネットワークレベル舗装管理システムにおいては、解析期間における管轄のプロジェクト群への予算配分、すなわち修繕計画を最適化することが目的である。

一般にプロジェクトレベルの場合では、比較的単純な多段階決定過程の最適化問題であり、その解析には動的計画法が用いられている。一方、ネットワークレベルの場合には、複雑な組み合わせ最適化問題が対象であり、その解析手法として線形計画法、整数計画法などが一般に用いられている¹⁾。しかしながら、これらの手法の場合、そのアルゴリズムは列挙法に基づいているので、単純ではあるが、計算量が膨大になるために、解析期間を短くしたり、プロジェクトの修繕回数に制約を付さなければならぬ場合が生じる。そこで本研究においては、ネットワークレベル舗装管理システムとして、動的計画法を適用した予算配分手法を構築することとした。そしてその解析事例として、解析期間における各年度、各プロジェクトの修繕計画を最適化することを試みた。

(1) パフォーマンスモデル

舗装管理システムの機能の中核は、システムに組み込む舗装のパフォーマンスモデルと修繕計画の最適化手法にある。舗装のパフォーマンスモデルには、一般に決定論モデルと、破損遷移の不確実性を考慮した確率モデルなどがあり、著者らは、前者についてはAASHTOモデル²⁾、ニューロパフォーマンスモデル³⁾を、後者についてはマルコフ確率モデル⁴⁾を提案した。しかしながら本研究においては、ネットワークレベル舗装管理システムにおける最適化手法の構築が主な目的であることから、比較的簡単なAASHTOモデルを使用することにした。

AASHTO指針⁵⁾におけるアスファルト舗装の構造設計式は式(1)のように表現できる。この式とアスファルト舗装要綱⁶⁾の構造設計式が、基本的に同一の設計概念によると見なせることは著者らの既往の研究²⁾で述べた。本研究においては、前述の理由により、式(1)をパフォーマンスモデルとして用いることにする。

$$\log_{10}(N/0.452) = 9.36 \cdot \log_{10}(T_A/7.26 + 1) - 0.96 \\ + 2.32 \cdot \log_{10}(CBR) + \frac{\log_{10}[\Delta PSI/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(T_A/7.26 + 1)^{5.19}} \quad (1)$$

ここで、

N: 累積5tf換算輪数

CBR: 路床土の設計CBR(%)

T_A : 舗装各層を表層及び基層用加熱アスファルト混合物で設計したときの必要厚さ、等値換算厚(cm)

修繕によって厚さdのアスファルト混合物によるオーバーレイを施工した後のパフォーマンスについては、式(1)の T_A の代わりに次式の T_{AR} を用いることによって表す。

$$T_{AR} = d + \alpha \cdot T_A \quad (2)$$

ここで、

T_A : 既設舗装の初期等値換算厚

T_{AR} : 修繕後における舗装の等値換算厚

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²⁾。

(2) 最適化手法

a) 記号の説明

解析に用いる記号を次のように表す。

m : プロジェクト番号, $m=1, 2, \dots, M$

n : 解析期間 n_{\max} の各年度, $n=1, 2, \dots, n_{\max}$

t : 舗装が新設または修繕された後の供用年数, $t=1, 2, \dots, t_{\max}$ 。新設後または修繕後 1 年未満の舗装は、供用年数 0 年目の舗装と見なす。

T_{Am} : プロジェクト m の等値換算厚 T_A の初期値

T_{Amn} : n 年度におけるプロジェクト m の等値換算厚

x_{mn} : n 年度におけるプロジェクト m の修繕のための予算配分

$uc_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn})$: プロジェクト m の舗装 T_{Amn} の供用年数が t_{mn} の場合に、 n 年度予算配分 x_{mn} を与えて修繕した時の利用者費用

$mc_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn})$: プロジェクト m の舗装 T_{Amn} の供用年数が t_{mn} の場合に、 n 年度予算配分 x_{mn} を与えて修繕した時の管理費用

rc : 修繕費用で、修繕工法は簡潔のためオーバーレイのみとし、各プロジェクトの修繕費用は同一とする。

b) トータルライフサイクルコスト

解析期間における修繕費用、管理費用(維持費用)、利用者費用(走行費用)の合計をライフサイクルコストとする。

ネットワークレベルの予算配分計画(=修繕計画)は、限られた資金の制約のもとで、トータルライフサイクルコストを最小にするように決定することとした。ここでいうトータルライフサイクルコストは複数のプロジェクトの場合、各プロジェクトの解析期間におけるライフサイクルコストの総和を指している。

ここで、

ネットワーク: M 個のプロジェクトによる構成

b : 解析期間 n_{\max} 年間にわたるネットワークの修繕のための総予算

$L_m(z_m)$: 解析期間において、プロジェクト m に z_m の修繕のための予算を配分した時のライフサイクルコスト ($m=1, 2, \dots, M$)

$\sum_m L_m(z_m)$: ネットワークのトータルライフサイクルコスト

とすると、問題は式(3)-2 の制約のもとに、式(3)-1 に示されるようにネットワークのトータルライフサイクル

コストを最小にする最適解 z_m^* を決定することである。

$$\min \sum_m L_m(z_m) = \sum_m L_m(z_m^*) \quad (3)-1$$

$$\sum_m z_m = b \quad (3)-2$$

c) 各プロジェクトのライフサイクルコスト

n 年度におけるプロジェクト m の修繕費用、利用者費用及び管理費用の和を、式(4)のように年度費用関数 $g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn})$ で定義する。

$$g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}) =$$

$$x_{mn} + uc_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}) + mc_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}) \quad (4)$$

プロジェクト m の解析期間 n_{\max} にわたるライフサイクルコスト $L_m(z_m)$ は、各年度の費用の総和となり、次の式(5)-1 のようになる。

$$L_m(z_m) = \min \sum_n g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}) \\ = \sum_n g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}^*) \quad (5)-1$$

この時、プロジェクト m の修繕のための予算配分 x_{mn} の解析期間における総和は、配分量 z_m に等しくなければならないので、次の制約を受けることになる。

$$\sum_n x_{mn} = z_m \quad (5)-2$$

d) 最適化のアルゴリズム

修繕のための総予算 b を m 個のプロジェクトに最適に配分した場合のトータルライフサイクルコストを $h_m(b)$ とすると、動的計画法における最適性原理⁷⁾により、次の関係が得られる。

$m=1$ の場合

$$h_1(b) = L_1(b)$$

$m \geq 2$ の場合

$$h_m(b) = \min\{L_m(z_m) + h_{m-1}(b - z_m)\}, 0 \leq z_m \leq b \quad (6)$$

プロジェクト m に配分された修繕のための予算配分量 z_m は、さらに解析期間内の各年度に配分される。このとき、式(5)-2 の制約のもとに、プロジェクト m の $L_m(z_m)$ を最小にする修繕政策は次の式(7)により一意的に決められる。

すなわち、状態 (T_{Amn}, t_{mn}) にあるプロジェクト m において、修繕のための予算 z_m を最適に各年度に配分した場合の n 年度以降のライフサイクルコストを示す費用関数を $f_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, z_m)$ とすると、同様に最適性原理を適用することにより、次の関係が得られる。

$n = n_{\max}$ の場合

$$f_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, z_m) = g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn})$$

$n < n_{\max}$ の場合

$$f_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, z_m) = \min\{g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}) \\ + f_{m,n+1}(T_{Am,n+1}, t_{m,n+1}, z_m - x_{mn})\} \quad (7)$$

ここで、一つのプロジェクトに対する「修繕する」または「修繕しない」の決定は二者択一の問題であり、「修繕する」の場合には修繕費用 rc 以上の予算を与えることは意味がないので、予算配分 x_{mn} は次のように与えられる。

$x_{mn}=0$ (修繕しない場合)

$x_{mn}=rc$ (修繕する場合) (8)

また、プロジェクト m の n 年度と $n+1$ 年度における等価換算厚と舗装の供用年数は、式(8)の修繕条件によって、次のように変換される。

$x_{mn}=0$ の場合

$$T_{Am,n+1} = T_{Amn}, \quad t_{m,n+1} = t_{mn} + 1$$

$x_{mn}=rc$ の場合

$$T_{Am,n+1} = T_{Arm,n+1}, \quad t_{mn} = 0 \quad (9)$$

以上の一連の最適化計算の概略をフローチャートで示すと、図-1 のようになる。またこの場合の計算の手順は次のようになる。

STEP 1：式(7)より、 $m=1$ に対し、いま仮に与えられた修繕総予算を $k \times rc$ ($k=整数, k \geq 0$) とした場合、 $z_1=0, rc, 2rc, \dots, krc$ の場合の $L_1(z_1)$ を計算し、 z_1 の関数としての $L_1(z_1), h_1(z_1)$ および z_1 に対する x_{1n} を記憶する。

STEP 2：式(7)より、 $m=2$ に対し $z_2=0, rc, 2rc, \dots, krc$ の場合の $L_2(z_2)$ を計算し、 z_2 の関数としての $L_2(z_2)$ および z_2 に対する x_{2n} を記憶する。

STEP 3：式(6)より、 $m=2$ に対し $b=0, rc, 2rc, \dots, krc$ の場合の $h_m(b)$ を計算し、 b の関数としての $h_m(b)$ および b に対する z_1, z_2 を記憶する。

STEP 4：以下、 $m=3, 4, \dots, M$ の順に、STEP 2 と STEP 3 の過程を繰り返す。

STEP 5： $m=M$ について、与えられた修繕総予算 b に対して、 $h_m(b)$ と b に対する z_M^* を求める。また z_M^* に対する x_{Mn}^* を求める。これはプロジェクト M に対する最適配分である。したがって、 $M-1$ 段階までの $M-1$ 個のプロジェクトに配分する修繕総予算は $b-z_M^*$ となる。

STEP 6： $m=M-1, M-2, \dots, 1$ の順に、STEP 5 の過程を繰り返す。最終の $m=1$ の時点で、最適配分 z_1^* と z_1^* に対する x_{1n}^* が決まる。

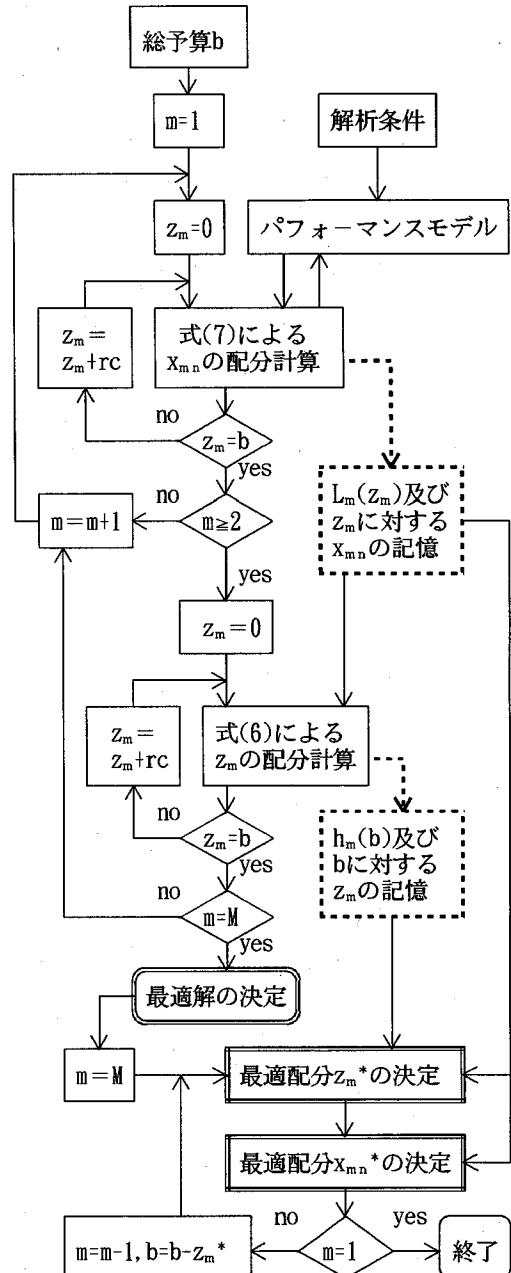
すなわち、この手法によれば修繕総予算 b を与えることによって、総予算が b 以下である場合の最適配分も同時に求められる。

e) アルゴリズムの具体的説明

ここで、計算アルゴリズムをより明確にするために、プロジェクトの数は 5 つで、与えられた修繕総予算を $b=10rc$ とした場合について、次の計算例で説明する。

STEP 1：プロジェクト 1($m=1$) に対し、 $z_1=0, rc, 2rc, \dots, 10rc$ の場合に、式(7)を用いて、 $L_1(0), L_1(rc), L_1(2rc), \dots, L_1(10rc)$ を計算し、 $L_1(z_1), h_1(z_1)=L_1(z_1)$ および z_1 に対する x_{1n} を記憶させる。

STEP 2：プロジェクト 2($m=2$) に対し、 $z_2=0, rc, 2rc, \dots, 10rc$ の場合に、式(7)を用いて、 $L_2(0), L_2(rc), L_2(2rc), \dots, L_2(10rc)$ を計算し、 $L_2(z_2)$ および z_2 に対する



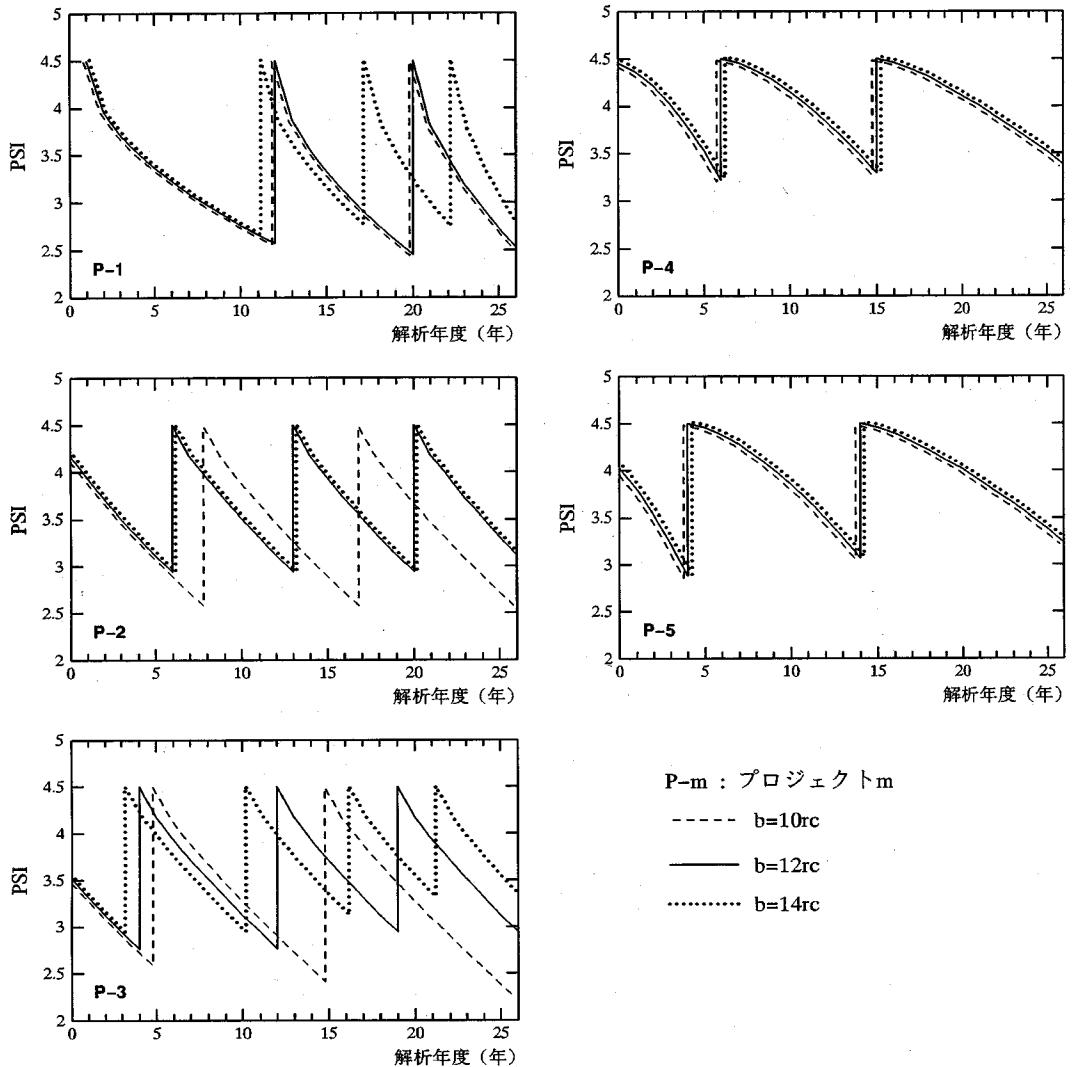


図-2 修繕のための総予算 $b=10rc, 12rc, 14rc$ の場合の修繕計画

仮に最小値が $L_2(2rc) + h_1(8rc)$ であれば、 $b=10rc$ に対して $z_2=2rc$ である。これらの $h_2(b)$ と b に対する z_2 が記憶される。

STEP 4: プロジェクト 3($m=3$)に対し、 $z_3=0, rc, 2rc, \dots, 10rc$ の場合に、式(7)を用いて、 $L_3(0), L_3(rc), L_3(2rc), \dots, L_3(10rc)$ を計算する。 $L_3(z_3)$ と z_3 に対する x_{3n} を記憶させる。 $L_3(z_3)$ と STEP 3 で計算した $h_2(b)$ を利用して、式(6)により 3 つのプロジェクトの配分計算を行う。これを $m=5$ まで、STEP 2 と STEP 3 の過程と同様に繰り返す。

STEP 5: 最適配分の決定を行う。 $m=5, b=10rc$ の場合には、プロジェクト 5 に対し、STEP 4 で記憶された $b=10rc$ に対する z_5 を拾いだす。その場合に $z_5=2rc$ で

あれば、プロジェクト 5 の最適配分は $z_5^*=2rc$ である。この $z_5^*=2rc$ に対する x_{5n} は STEP 4 すでに記憶されている。その場合に $x_{5,4}=rc, x_{5,14}=rc$ であれば、プロジェクト 5 の最適修繕計画は 4 年目と 14 年目で修繕を行うことになる。

STEP 6: 残り 4 つのプロジェクトにおいて、配分できる予算は $b=10rc - 2rc = 8rc$ となる。最後の $m=1$ のプロジェクトまで、STEP 5 の過程を繰り返すことによって、各プロジェクトの最適配分（最適修繕計画）が決まる。

表一1 プロジェクトの舗装構造と交通条件

プロジェクト No.	交通区分	初期 T _{Am}	供用年数	全交通量	5tf換算輪数
P-1	D	34	0	13,000	9,600
P-2	C	26	2	9,000	1,900
P-3	C	26	5	9,000	1,900
P-4	B	19	2	5,000	270
P-5	B	19	5	5,000	270

注：(1)単位[5t換算輪数]=輪／日，[全交通量]=台／1日・1方向・1車線

(2)供用年数は解析時における各プロジェクトの供用履歴年数を示す。

3. 解析事例

(1) 解析条件

5つのプロジェクトより構成するネットワークを解析事例とする。解析条件は、次のように設定した。

a) 現在価値法

現在価値法に基づき、解析期間の n 年度において発生する費用 $g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn})$ を次の式(10)を用いて、初年度の価値 a_{mn} に換算する。

$$a_{mn} = g_{mn}(T_{Amn}, t_{mn}, x_{mn}) / (1+i)^n \quad (10)$$

ここで、 i は割引率で 5 %とした。

b) 管理費用と利用者費用

管理費用 mc (円/m²)、利用者費用 uc (円/km・台) と供用性指数 PSI との関係は、建設省⁸⁾と安崎ら⁹⁾の研究を参考に作成した式²⁾を用いた。

$$mc = 168.24 - 27.52 \cdot PSI \quad (11)$$

$$uc = 7.38 - 3.44 \cdot PSI + 0.4 \cdot PSI^2 \quad (12)$$

c) その他の入力数値

解析期間：AASHTO 指針⁵⁾によれば、道路(プロジェクト)のランクによる 15~50 年であるが、ここでは 25 年とする。

道路延長：1 km、車線数：2

車線の幅員：3.5 m、交通増加率：0

新設後または修繕後の初期供用性指数： $PSI=4.5$

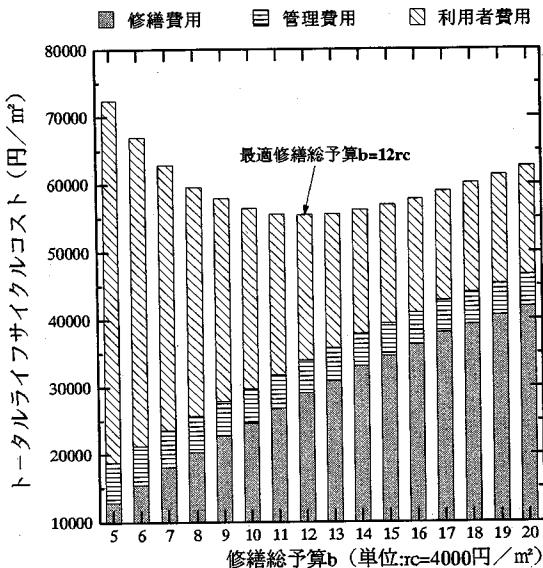
限界供用性指数： $PSI_{cr}=1.5$

修繕工法：オーバーレイ（厚さ 5 cm）

修繕費用：4000 円/m²とした。

修繕のための総予算：修繕費用 $rc=4000$ 円/m² の 20 倍の金額を与える。

ネットワークを構成する各プロジェクトの舗装構造と交通条件は、アスファルト舗装要綱⁶⁾を参考に表一の



図一3 トータルライフサイクルコストと修繕総予算

ように設定した。路床土の CBR は 8 %とする。

(2) 解析結果

a) 修繕総予算が与えられた場合の修繕計画

いま修繕のための総予算として $b=10rc, 12rc, 14rc$ が与えられた場合、本システムの解析結果によれば、解析期間における各プロジェクトの修繕時期と舗装の供用性指数 PSI の変化は図一2 のように求められる。この場合、P-4 と P-5 の場合には、総予算の変化にかかわらず、修繕時期と PSI の回復はオーバーレイによる修繕を意味する。この修繕時期が修繕費用の予算要求年度である。なお、管理費用（維持費用）については、各年度において経常的に要求されるものとしている。

b) トータルライフサイクルコストと最適総予算

修繕のための総予算が $b=5rc \sim 19rc$ の場合のトータルライフサイクルコストの計算結果を図示すると、図一3 のようになる。これによれば、総予算が $b=12rc$ の場合にトータルライフサイクルコストは最小となる。すなわち、利用者費用（走行費用）も含めて舗装のライフサイクルコストを評価すれば、予算額の最適値が存在し、本事例の場合では $b=12rc$ である。なお、この場合の修繕計画は、各プロジェクトをプロジェクトレベル舗装管理システム²⁾によって求めた場合と一致することを確認している。

トータルライフサイクルコストを占める利用者費用、維持費用、修繕費用の割合の変動は、図一3 に示されるように修繕費用が少ない場合には利用者費用（走行費用）

が大きく、修繕費用の増加に伴って利用者費用は急激に減少する。

4. むすび

既往のネットワークレベル舗装管理システムの最適化は、一般に線形計画法、整数計画法などによるが、これらの手法による場合、計算量が膨大になるために、無理な制約条件を付さなければならぬ場合が生じる。そのようなことから、本研究では最適化手法に動的計画法を適用したアルゴリズムを開発することにより、既往のネットワークレベル舗装管理システムのこれらの問題点の解決を図った。この最適化手法を用いることにより、解析期間における修繕のための総予算が与えられた場合のネットワーク（道路区間群）に対する最適予算配分（修繕計画）を決定することができる。

本研究の解析事例は、簡潔のため5プロジェクトで示したが、PC 98シリーズのパーソナルコンピュータで20程度のプロジェクト群を処理することが可能である。さらに大量のプロジェクト群によるネットワークの場合には、ワークステーションコンピュータなどで処理することになろう。

参考文献

- 1) Cook, W. D. and Lytton, R. L.: Recent Developments and Potential Future Directions in Ranking and Optimization Procedures for Pavement Management. *Second North American Conference on Managing Pavements*, 1987.
- 2) 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（ノート），土木学会論文集，No. 502/V-25, pp. 167-170, 1994.11.
- 3) 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（ノート），土木学会論文集，No. 496/V-24, pp. 99-102, 1994.8.
- 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, pp. 135-141, 1990.8.
- 5) AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1986.
- 6) アスファルト舗装要綱，日本道路協会，1992年11月。
- 7) 鍋島一郎：動的計画法，森北出版，1973.7
- 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) 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.

(1995.2.2 受付)

OPTIMIZATION OF NETWORK LEVEL PAVEMENT REPAIR PROGRAM

Yong-Jian KONG and Tadashi FUKUDA

In this study, we developed a network level pavement management system based on dynamic programming. Using this system, we can decide its optimal repair program in the case when the total budget of the network during its analysis period is given.