

動的計画法によるコンクリート橋の年間維持修繕計画の最適化に関する研究 *

STUDY ON OPTIMAZATION OF MAINTENANCE PROGRAM FOR THE YEAR
FOR CONCRETE BRIDGES BY DYNAMIC PROGRAMMING

原田 隆郎 ** ・ 岩松 幸雄 ***

By Takao HARADA and Sachio IWAMATSU

In recent years, concept institution and systematization of Maintenance Management have been of importance. But, it is not yet systematized to plan the maintenance program for the year for the most suitable investment of budget.

In this study, we developed subsystem for the most suitable program for the year by using Dynamic Programming, and verified the efficiency of the proposed subsystem. As the result, it is demonstrated that our subsystem could be possible intentional and economical employment of budget.

1. はじめに

近年、既存構造物の維持管理について、その概念設定およびシステム化の重要性が高まってきており、特に維持管理業務のシステム化については、大学の研究室および研究機関各所で精力的な研究が進められている。そして、最近応用頻度が高まっているエキスパートシステムについても、これを維持管理の分野に利用しようとする研究が盛んであることは周知のとおりである。

しかしながら、エキスパートシステム化をはじめ、維持管理のシステム化に関するこのような研究は、1つの構造物の健全度診断や長期供用性の予測、維持修繕工法の選定等に限られており、維持管理を行

っていく上での重要な要素の1つである年度内の予算配分の問題を考慮した維持修繕計画の策定については、それが複雑なプロセスおよびノウハウを必要とし、また考慮すべき要素が多種多様でトレードオフの関係にあることなどから、システム化およびエキスパートシステム化には至っていないのが現状である。

そこで、本研究では、年間の維持修繕計画の策定に対して数学的計画手法である動的計画法(DP: Dynamic Programming)を用い、同種構造物の管理区域内の最適予算配分を考慮した「最適年間計画策定サブシステム」を維持修繕エキスパートシステムの支援サブシステムとして構築した。なお、本研究では、研究対象構造物としてコンクリート橋を取り上げている。

2. 本研究の位置づけ

(1) 維持管理システム^{1) 2)}

我々の研究室では、維持管理業務全般のシステム化をめざした維持管理システムの提案および構築を

* キーワード: 年間維持修繕計画, 動的計画法

** 正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科(〒316 日立市中成沢町4-12-1)

*** 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科

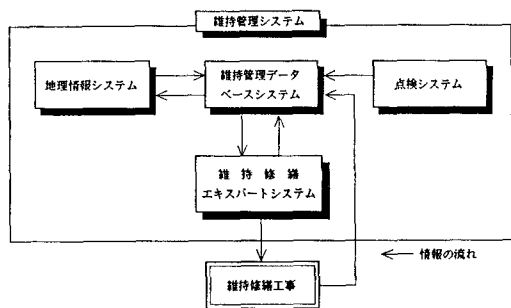


図-1 維持管理システムの構成

行っている（図-1参照）。維持管理システムは、①劣化や損傷を早期に発見するための点検の役割を担う点検システム、②点検結果を含めた維持管理業務に必要なデータの整備および管理を担う維持管理データベースシステム、③整備されたデータを用いた経済的で効果的な維持修繕の検討を担う維持修繕エキスパートシステム、④維持管理に関する地図・図面等のイメージ情報の一元的な収納、管理、提供とそれらの効果的なアウトプットの役割を担う地理情報システムから構成されている。

（2）維持修繕エキスパートシステム^{2) 3)}

維持修繕エキスパートシステムは、管理区域内の橋梁に対して「どの橋梁の、どの部材を、いつ、ど

のような工法で維持修繕すれば経済的かつ効果的であるか」という一連の判断を行うもので、管理条件およびデータ入力部、維持修繕計画策定部、結果表示部を中心に、維持修繕計画策定部のための支援サブシステム、支援ツール、支援知識ベースから構成されている（図-2参照）。

本研究で対象としている年間維持修繕計画の策定は、この中の支援サブシステムの1つとして位置づけられており、最適年間計画策定サブシステムとして維持修繕エキスパートシステムを支援している部分である。

3. 長期維持修繕計画と年間維持修繕計画

維持修繕計画は、その性格から長期維持修繕計画と年間維持修繕計画に分けられる。橋梁を対象として考えると、ある特定の橋梁について、その橋梁をどのように維持修繕していけば経済的かつ寿命の延伸が図れるかを計画するものが長期維持修繕計画であり、複数の橋梁に対して、ある1年間にどの橋梁を維持修繕すればよいかを計画するものが年間維持修繕計画である（図-3参照）。

前者はライフサイクルの延伸とライフサイクルコストの最小化というトレードオフの関係を考慮して、橋梁自身にとって最適な維持修繕計画とはどういっ

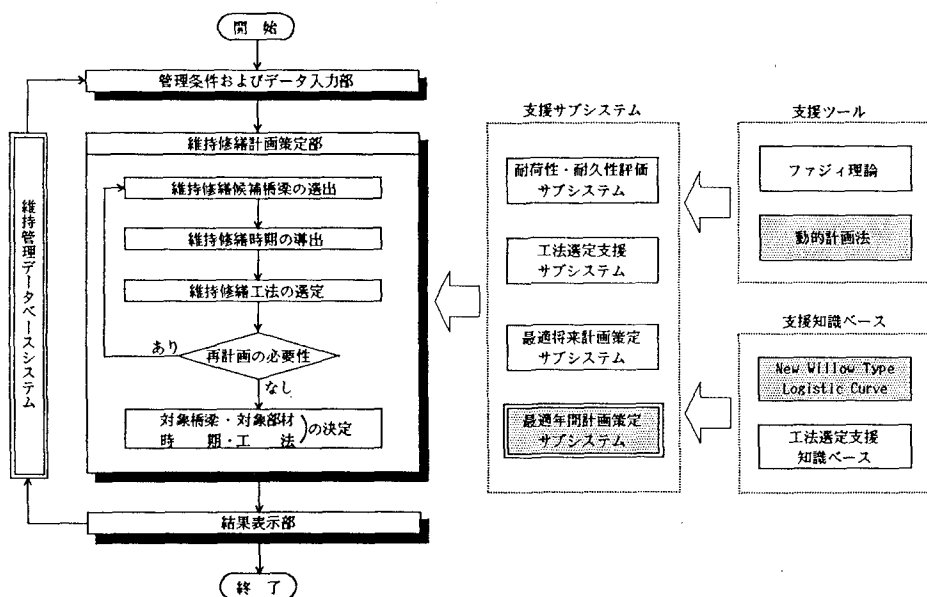


図-2 コンクリート橋の維持修繕エキスパートシステムのフロー

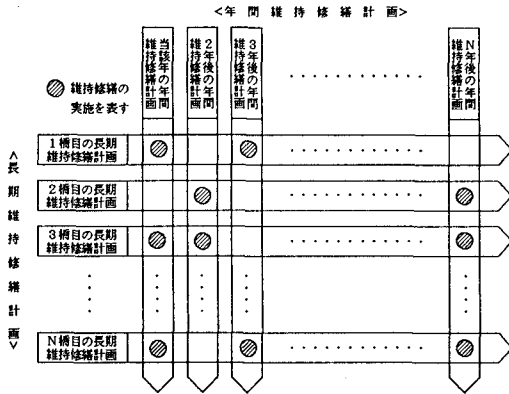


図-3 長期維持修繕計画と年間維持修繕計画

たものかを策定し、後者は維持修繕費用と当該年度に準備される予算を考慮し、その年に維持修繕の可能な橋梁を選出するものである。

4. 最適化の考え方

(1) 生涯機能関数の設定

a) New Willow Type Logistic Curve

我々の研究室では、専門家の考えを取り入れた構造物劣化の時間的変化を予測する手法としてNew Willow Type Logistic Curveを提案している⁴⁾。この曲線では構造物の破壊時付近の長期供用性を表現するため、正規分布関数による成長曲線を用いて、構造物の供用年数と機能水準（構造物の持つ安全、安定、安心の尺度）の関係を表現している。

$$Z_i(t) = Z_i(t_i) - \int_{t_i}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \cdot \exp \left[-\frac{(t - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] dt \quad (1)$$

ここで、 $Z_i(t)$ ：第*i*回目の維持修繕における*t*年目の機能水準、 t_i ：第*i*回目の維持修繕年、 $Z_i(t_i)$ ：第*i*回目の維持修繕年における機能水準、 σ_i ：第*i*回目の維持修繕における標準偏差、 μ_i ：第*i*回目の維持修繕における平均値である。つまり、Logistic Curveのパフォーマンスは(1)式の右辺の第2項が正規分布の累積分布関数であるため、標準偏差 σ と平均値 μ によって変化する。

b) 関数式の設定

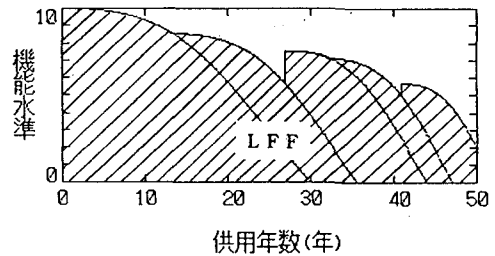


図-4 New Willow Type Logistic Curveと生涯機能関数LFF

本研究では供用開始から目標供用年までを50年と設定し、この間の各年の維持修繕の対策を決定するために、生涯機能関数という概念を設定した。生涯機能関数とは、橋梁の供用状態が供用開始から目標供用年までにどのような変化をしたかを、New Willow Type Logistic Curveの機能水準の変化で表したものである（図-4参照）。

$$LFF = \int_0^{GY} Z(T) dT \quad Z(T) > 0 \quad (2)$$

ここで、LFF：生涯機能関数、 $Z(T)$ ：供用開始後*T*年目の機能水準、GY：目標供用年(50年)である。

(2) 生涯費用関数の設定

(1)の生涯機能関数と同様に、この間の各年の維持修繕の対策を決定するために、生涯費用関数という概念を設定した。生涯費用関数とは、供用開始から目標供用年までの各年において維持修繕のために要した費用の合計である。

$$LCF = \int_0^{GY} C(T) dT \quad C(T) \geq 0 \quad (3)$$

ここで、LCF：生涯費用関数、 $C(T)$ ：供用開始後*T*年目の維持修繕費用、GY：目標供用年(50年)である。

なお、 $C(T)$ については、補強費用 C_k と補修費用 C_s の和として次式によって算出した。

$$C(T) = C_k + C_s \\ = \sum_{i=1}^M v(i) \cdot l(i) + \sum_{j=1}^N w(j) \cdot s(j) \quad (4)$$

ただし、 $v(i)$ ：*i*番目の部材に対する補強工法の1m当たりの費用、 $l(i)$ ：*i*番目の部材の部材長、

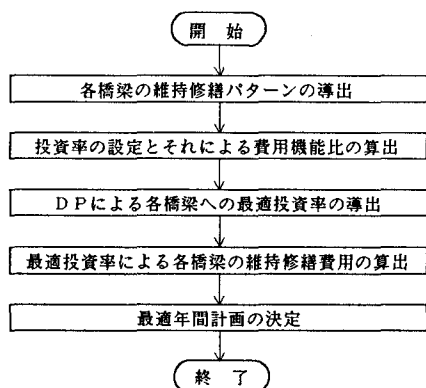


図-5 最適年間計画策定の流れ

M: 補強工法を行う部材の総数, $w(j)$: j 番目の損傷に対する補修工法の 1 m^2 当たりの費用, $s(j)$: j 番目の損傷の損傷面積, N : 橋梁に存在する損傷の総数である。

(3) 費用機能費の設定

(1) の生涯機能関数と (2) の生涯費用関数を用いて, 生涯費用 1 単位における生涯機能の割合として費用機能費 CFR を設定した。本研究では, この費用機能費が最大 ($CFR \rightarrow \max$) となるように維持修繕時期と維持修繕工法 (無対策, 補修, 補強) を決定した。

$$CFR = LFF / LCF \quad (5)$$

ここで, CFR : 費用機能費, LFF : 生涯機能関数, LCF : 生涯費用関数である。

5. 最適年間維持修繕計画の策定

(1) 計画策定の概要

当該年度の最適な予算配分を行うためには, 各橋梁の最適な長期維持修繕計画が決定されている必要がある。この長期維持修繕計画は, 最適将来計画策定サブシステムにおいて, 各橋梁ごとに前節の (3) で示した費用機能費 CFR が最大となるように, 目標供用年までの各年における維持修繕工法を決定することで策定される。

年間維持修繕計画は, この長期維持修繕計画において当該年度に対策を施す必要があると決定した橋梁について, 最適な予算配分を考慮して維持修繕を施すべき橋梁を決定するものであり, 本研究では最適年間計画策定サブシステムにおいて策定される。

(2) 最適年間計画策定サブシステム

本サブシステムの流れを図-5 に示し, 以下でその概要について説明する。

a) 維持修繕パターンの導出

当該年度に最適施策として提案されている維持修繕工法について, その工法のランクを落とした場合の可能な限りの組み合わせを維持修繕パターンとして導出する。このとき, 橋梁に存在する複数の部材すべてについてこの設定を行うことから, 維持修繕パターンの数は各部材で設定されるそれぞれの維持修繕工法の数の総積となる。また, ここでは維持修繕パターンの導出と同時に, 設定された各維持修繕パターンそれぞれについて長期維持修繕計画を策定しなおし, 併せてそのときの費用機能比および維持修繕費用も算出する。

b) 投資率の設定とそれによる費用機能比の算出

投資率 x^* は, 年度予算を 100% としたとき, それぞれの維持修繕費用はその何% に当たるかを表したものである。しかしながら, この投資率 x^* は各維持修繕パターンの費用と一致しており, 費用機能比 $CFR^*(x^*)$ の存在しない投資率 x^* については補間による近似を行い, 0 から 100 までのすべての x^* について $CFR^*(x^*)$ を算出する。

c) DP による最適投資率の導出

すべての投資率について費用機能比 $CFR^*(x^*)$ が算出されたら, DP を用いて最適投資率 x_s^* を導出する。つまり, 投資率 x^* を第 i 橋に投資したときの費用機能比を $CFR_i^*(x^*)$ とし, 当該年度の維持修繕候補橋梁数 N に, 比率に直した年度予算 $BG^*(=100)$ を投資して得られる最大費用機能比を与える最適投資率 $x_s^* = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ を求める。

いま, 第 k 橋目に BG^* を投資して得られる最大費用機能比を $f_k^*(BG^*)$ とおき, 関数方程式

$$f_k(BG^*) = \max_{0 \leq x \leq C} [CFR_k^*(x^*) + f_{k-1}^*(BG^* - x^*)] \quad (k=2, 3, \dots, N) \quad (6)$$

$$f_1^*(BG^*) = CFR_1^*(BG^*) \quad (k=1) \quad (7)$$

を表解法 (table method) を用いて計算することによって⁹⁾, 最適投資率 x_s^* を導出する。

表-1 最適投資率を導出するためのDP表

a) 第1段階												
C.F.R.(x)	x	C.F.R.(x)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	135	418	438	475	535	587	604	627	666	679	679	679
10	169	452	487	509	570	601	638	661	700	713	713	
20	212	495	530	552	613	644	681	704	743	756		
30	254	537	572	594	655	686	723	746	785			
40	260	543	578	600	661	692	729	752				
50	260	543	578	600	661	692	729					
60	260	543	578	600	661	692						
70	260	543	578	600	661							
80	260	543	578	600								
90	260	543	578									
100	260	543										

は第2段階の
 $f_3(100-x)$ を表す

b) 第2段階												
C.F.R.(x)	x	$f_3(100-x)$										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	192	611	646	687	729	764	805	847	878	915	938	977
10	216	635	670	711	753	788	829	871	902	939	962	
20	234	653	688	729	771	806	847	889	920	957		
30	264	683	718	759	801	836	877	919	950			
40	306	725	760	801	843	878	919	961				
50	336	755	790	831	873	908	949					
60	363	782	817	858	900	935						
70	381	800	835	875	918							
80	381	800	835	875								
90	381	800	835									
100	381	800										

は第3段階の
 $f_3(100-x)$ を表す

c) 第3段階												
C.F.R.(x)	x	$f_3(100-x)$										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	224	835	870	911	955	998	1040	1071	1102	1139	1165	1201
10	256	867	902	943	985	1020	1061	1099	1134	1171	1195	
20	294	905	940	981	1023	1058	1099	1141	1172	1207		
30	304	915	950	991	1033	1068	1109	1151	1182			
40	321	932	967	1008	1050	1085	1126	1168				
50	337	948	983	1024	1066	1101	1142					
60	350	961	996	1037	1079	1114						
70	365	976	1011	1052	1094							
80	377	988	1023	1064								
90	377	988	1023									
100	377	988										

は第4段階の
 $f_3(100-x)$ を表す

表-1は、複数の橋梁について、最適投資率を導出するためのDP表の流れを示したものであり、第1段階の表(a)は第1橋目と第2橋目について、第2段階の表(b)は第1橋目と第2橋目の最適解と第3橋目について、というように第3段階の表(c)、第4段階、……、第N段階というように処理が進むことになる。

最適投資率は、この第N段階の表において最大の費用機能比を与える投資率から、第1段階まで逆に投資率を追っていくことにより求まる。

d) 最適投資率による維持修繕費用の算出

表-2 本システムの運用結果

a) T 橋

対策回数	最適将来計画からの結果			最適年間計画からの結果		
	時期	費用(万円)	費用機能比	時期	費用(万円)	費用機能比
1 回目	0	2,086	114	0	1,852	109
2 回目	10	3,590		9	3,345	
3 回目	22	1,928		20	2,011	
計	--	7,604	----	--	7,208	----

b) U 橋

対策回数	最適将来計画からの結果			最適年間計画からの結果		
	時期	費用(万円)	費用機能比	時期	費用(万円)	費用機能比
1 回目	0	3,159	141	0	2,187	140
2 回目	9	2,560		8	2,476	
3 回目	19	1,945		19	2,104	
計	--	7,664	----	--	7,397	----

c) V 橋

対策回数	最適将来計画からの結果			最適年間計画からの結果		
	時期	費用(万円)	費用機能比	時期	費用(万円)	費用機能比
1 回目	0	1,258	138	0	1,258	138
2 回目	10	2,524		10	2,524	
計	--	3,782	----	--	3,782	----

注)「時期」の欄の数字はシステム運用年からの年数を表す。

最適投資率、つまり各橋梁に年度予算を何%ずつ配分すればよいかが決定したら、その割合をもとに各橋梁の最適投資額を算出する。そして、この最適投資額を基にして実際の維持修繕費用を算出した。

e) 最適年間計画の決定

各橋梁の維持修繕費用が決定すれば、それぞれの橋梁の各部材をどのような工法で維持修繕すればよいかはすでに決定されているのも同じである。つまり、最適な維持修繕費用を与える維持修繕パターンが当該年度の最適年間計画となる。

6. 検証

実際の橋梁であるT橋、U橋、V橋を対象に、①それぞれの橋梁を単独で計画した場合、つまり3橋の長期維持修繕計画と、②予算制約により3橋を総合的に計画した場合、つまり本サブシステムにより予算に収まるように3橋の年間維持修繕計画を決定した場合とについて、それぞれの場合の費用機能比、ライフサイクルコスト、各供用年数における費用を比較し考察を加えた。なお、年間予算として入力する値は、各橋梁の維持修繕費用等を考慮して6,000万円とした。

運用結果を表-2に示す。この結果では、現在において、V橋は最適将来計画の結果がそのまま最適年間計画として採用されているが、T橋およびU橋

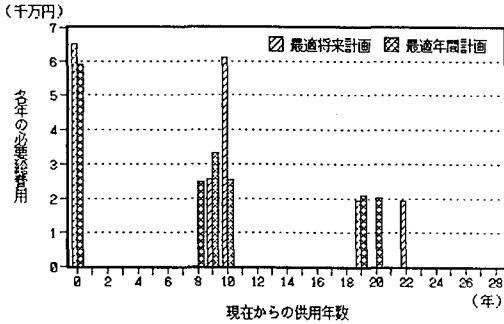


図-6 供用年数と各年の必要総費用との関係

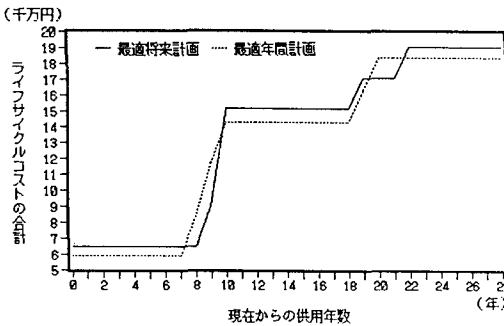


図-7 供用年数とライフサイクルコストとの関係

については対策時期および工法ともに変更されている。また、T橋およびU橋の2回目と3回目の計画もあわせて導出したが、これも最適将来計画の結果とは異なったものとなった。

以上の結果について、供用年数と各年の必要総費用の関係を図-6に、供用年数とライフサイクルコストの関係を図-7にまとめた。まず図-6をみると、最適将来計画の場合は現在と10年後に予算の6,000万円をオーバーする年度があるが、最適年間計画の場合ではすべて予算を下回る結果、すなわち経済的な予算の運用になっていることがわかる。また、図-7において28年間のライフサイクルコストの合計を最適将来計画の結果と最適年間計画の結果において比較すると、最適将来計画の結果の方が19,050万円で、最適年間計画の結果の方が18,387万円となっており、後者の結果の方がライフサイクルコストの合計が安いことがわかる。なお、このとき費用機能比の差はトータルで6だけ最適年間計画の結果の方が小さかったが、ほとんど差はないと考えられることから、予算の制約により年間計画を施しても、経済的で効果的な年間維持修繕計画が策定で

きることが確認された。

7. おわりに

本研究では、年間維持修繕計画の最適化を図るため、数学的計画手法である動的計画法を用いてシステム構築を行った。その結果、これまで専門家の判断に依存していた維持修繕計画策定という作業に対してDPを導入することの有効性が証明された。

しかしながら、本研究のモデルである費用機能比という概念1つを取り上げてみても、生涯機能関数および生涯費用関数の定義の仕方⁶⁾を更に検討する必要がある。New Willow Type Logistic Curveについても、維持修繕工法の標準化と、標準化された工法による維持修繕の効果の定量化を行っていく必要がある。

また、本研究ではコンクリート橋を研究対象構造物としてシステム構築を行ったが、今後は、他の道路構造物(アスファルト舗装等)に対してのモデル構築と共に、同一管理区域内の全構造物を対象とした年間および中・長期維持修繕計画へと拡張の予定である。

【参考文献】

- 1) 早川裕史, 岩松幸雄: 維持管理の概念に関する一考察, 第45回年次学術講演会, 講演概要集VI-92, pp. 208-209, 1990年。
- 2) 岩松幸雄, 早川裕史, 原田隆郎: 道路構造物の維持管理システムに関する研究, 土木学会論文集No. 444/VI-16, pp. 69-76, 1992年。
- 3) 原田隆郎, 岩松幸雄, 黒沼秀友, 小森俊英: コンクリート橋の維持修繕システムに関する研究, 第45回年次学術講演会, 講演概要集VI-93, pp. 210-211, 1990年。
- 4) 阿久澤孝之, 岩松幸雄, 早川裕史: 道路構造物の劣化・損傷を表現するモデルの提案, 第46回年次学術講演会, 講演概要集VI-165, pp. 356-357, 1991年。
- 5) 鍋島一郎: 動的計画法, 森北出版, 1968年。
- 6) 土木学会編: 土木計画学シリーズIV土木計画における最適化, 技報堂出版, 1979年。