

## 論文 多属性効用理論に基づく既存コンクリート橋の最適維持管理手法

片山憲一\*1・森川英典\*2・河合優\*3

**要旨:** 年々増加の一途をたどる老朽化橋梁に対し、有効かつ効率的に補修・補強を行うことは非常に重要である。本論では補強工法に外ケーブル工法を選択し、『最小の補強量で橋梁全体系のバランスを向上させ、供用期間中の安全性を確保する。』という考え方のもと、多属性効用理論に基づいて最適な補強時期及び各主桁のプレストレス量を算定する手法を提案した。また本手法を実橋に適用し、その有効性を確認した。

**キーワード:** 多属性効用理論, 既存コンクリート橋, 維持管理, 外ケーブル工法

## 1. はじめに

著者らは、これまで、コンクリート橋の維持管理手法として、現場試験結果の統計解析に基づく安全性評価手法[1]、経年劣化予測手法[2]を提案し、実橋へ適用してきた。これらの手法により、簡易な材料試験を最適な時期に行うことにより、橋梁の余寿命を知ることができる。また、これらの経年劣化および余寿命に基づいて適切な対策を講じることにより、合理的な維持管理が可能となる。そこで、本論では、最適な維持管理の考え方について述べ、その考え方のもと、多属性効用理論を用いて、最適な維持管理対策、つまり補強の時期と程度を算定する手法を提案する。また本手法を実橋に適用し、その有用性を確認する。

## 2. 最適維持管理の考え方

維持管理における決定事項としては、補強時期、回数、補強工法を選択、更には検査回数や時期といったものがある。しかしながら、これらすべての要因を同時に考慮すると、最適化問題として非常に複雑となる。そこで本研究では、第1段階として以下のような前提条件を設けた。本研究では横桁を有する3主桁のコンクリート橋1橋に着目し、補強は供用期間中に一回だけ行うこととした。補強工法には、曲げ及びせん断耐荷力の増加のほかに、ひび割れが閉じることによる修復や剛性の回復も期待できる外ケーブル工法を選択することとした。最適化の決定事項は、補強時期および各主桁のプレストレス量である。維持管理を考えるにあたっては、定められた供用期間中の橋梁の安全性を確保することが重要であり、過補強による大幅な安全性の向上は経済的でない。今後、さらに増加してくる老朽化橋梁に対して合理的に補強を行うためには、補強量ができる限り小さくなるような最適な補強時期を選定する必要がある。

橋梁は何本かの主桁を並列させ、それらを横桁で連結して供用する。そのため、荷重分配が起こり、荷重は、剛性の大きい桁に集中することとなる。著者らが行った過去の実橋試験結果によると、供用開始からかなりの年数を経たものは、外桁に比べて中桁の剛性が低下しており、このことは、外桁への荷重の集中を生じさせ、安全性を低下させる原因となっている[1]。また、主桁

\*1(株)横河ブリッジ, 工修 (正会員)

\*2神戸大学助教授 工学部建設学科, 工博 (正会員)

\*3神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻 (正会員)

間の剛性のアンバランスは、外桁の劣化を促進させることとなる[3]。逆に、荷重分配特性が大きく安全性に影響しているということは、主桁の局部的な補強が橋梁全体系の安全性を向上させ、かつ、劣化を抑制することになると考えられる。すなわち、この場合、最も劣化している中桁の剛性をより大きく回復させ、各主桁の剛性バランスを良好にすることにより、橋梁全体系の安全性を向上させる可能性を示している。

これらより、最適な維持管理とは、『最小の補強量で橋梁全体系のバランスを向上させ、供用期間中の安全性を確保すること。』とし、最適化の目標として、以下の3点を考慮した。

- ① 供用期間中の各主桁の安全性を最低限確保する。
- ② 各主桁のプレストレス量(補強量)は最小とする。
- ③ 各主桁間の剛性のバランスを向上させる。

この最適維持管理の考え方に基づいて、以下に最適維持管理手法を提案する。

### 3. 多属性効用理論に基づく最適維持管理手法

#### 3.1 多属性効用理論

ある対策の望ましさの程度を知るには、各属性の達成度を同一の指標で表す必要がある。統一尺度には、しばしば「効用」の概念が導入される。効用とは、意思決定者にとって真の価値を示す尺度として定義される。その効用の概念を用いることにより、各属性を単属性効用関数として、数学的に扱える形に表すことができる。しかし、最適維持管理手法は上述したように、いくつかの目的の達成を同時に目指す多目的問題となる。このような多目的決定分析には単属性効用関数に代わって、多属性効用関数を求める必要がある。多属性効用関数は数種の目的達成度を測る何種類かの有効度指標を効用タームで表現して結合したものであるが、問題の大きさや目的間の従属性等によって、関数そのものの構築は極めて複雑で困難になってくる。そこで、本手法では、選考独立と効用独立の仮定を設けることにした。この2つの過程により、多属性効用関数は、個々の単属性効用関数の汎関数とすることができ、 $n$ 個の属性からなる多属性効用関数  $u(x_1, \dots, x_n)$  は、以下のように求めることができる。

$$u(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{k} \left( \prod_{i=1}^n [1 + k k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \quad (1)$$

ただし、 $k$  および  $k_i (i=1, \dots, n)$  は定数で、 $u_i(x_i)$  は、 $x_i$  の最も望ましい状態を  $x_i^*$ 、最も望ましくない状態を  $x_i^0$  としたとき、 $u_i(x_i^*) = 1.0$ 、 $u_i(x_i^0) = 0.0$  となるように定められた周辺効用関数である。各属性の周辺効用関数については、リスク回避性を考慮して、指数型効用関数を用いることとした。このようにして算出される多属性効用関数を用い、多目的決定問題となる最適維持管理手法に適用していくこととする。

#### 3.2 最適維持管理手法への適用

最適維持管理手法の確立にあたって、各構造パラメータ ( $f_c, E_c, I, EI$ ) の経年劣化を仮定する必要がある。これらの経年劣化仮定については、著者らが行った実橋試験結果に基づいて評価することとした。また、前提として、実際の維持管理レベルを考慮して、供用期間中の検査において橋梁構成材料の試験結果のみが得られる場合を想定している。すべての劣化を材料試験結果から判断することは困難であるが、本手法は過去の実橋試験結果に基づいており、他の要因(剛性の変化等)は間接的に考慮されている。実際の橋梁は、いくつかの主桁を並べて構成されているが、

それぞれの主桁において、荷重条件、環境条件などは異なる。このことは、各主桁の劣化の進行にも影響を与えることになる[2]。このことに着目して、本研究では中桁・外桁と別々に経年劣化を仮定することにした。図-1に各構造パラメータの経年劣化仮定の設定フローを示す。基本となるのは、中桁・外桁のコンクリート弾性係数の経年変化、剛性バランスの経年変化であり、これらのデータを基にして、他の構造パラメータの経年劣化を仮定する。

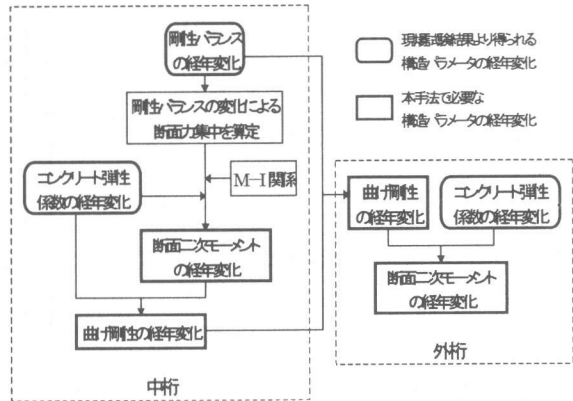


図-1 構造パラメータの経年劣化仮定の設定フロー

補強後の安全性評価および経年劣化予測については以下のように行う。まず、安全性評価についてであるが、耐荷力モデル作成に用いる算定式は曲げ耐荷力の場合、アンボンド PC の終局曲げ耐力算定式である Pannell 式[4]、せん断耐荷力の場合、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式を用いる。外ケーブル補強工法は、耐荷力の増加のみならず、剛性の回復にも効果がある。そこで、本研究では、外ケーブル工法による断面二次モーメントの回復を、各断面において引張応力を生じないプレストレス量となったとき、全断面有効となるように仮定した。この仮定のもと、逐次摂動法を用いた確率有限要素法による断面力解析[1]を行い、断面力モデルを作成する。これらの耐荷力と断面力モデルを用いて、Hasofer&Lind の安全性指標  $\beta$  [1]を算定し、安全性を評価する。

補強後の経年劣化予測曲線は、補強前のものと異なる。なぜなら、安全性の経年劣化は主桁間の剛性バランスに大きく影響されるためである[3]。補強により剛性バランスが図-2のように  $B_{EI} \rightarrow B'_{EI}$  (点 C→点 F)に変化した場合、補強後の剛性バランスの経年変化(曲線 EFG)は、補強前のものと同じ傾向を持つと仮定する。また、補強後の剛性バランスの経年変化に基づいて作成された経年劣化予測[2]を図-3に示す  $F'(t)$ (曲線 KMN)とする。補強後の経年劣化予測  $F_R(t)$ (曲線 QR)は、この  $F'(t)$ と同様の経年変化の傾向を持つものとし、図-2に示すように補強前の剛性バランスの経年変化が補強後の剛性バランスとなる点(点 B)を求め、その橋齢  $t^*$ を用いることにより、補強後の経年劣化予測曲線を作成することとした。すなわち、 $F'(t)$ の曲線 LN の点 L を点 I に平行移動させる(矢印 I)ことにより、曲線 OP を作成する。次

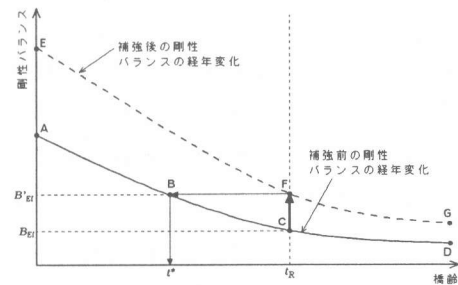


図-2  $t^*$ の算出

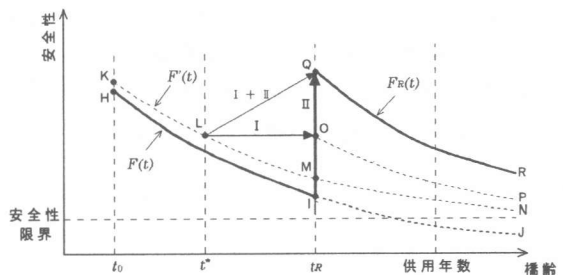


図-3 補強後の経年劣化予測曲線

に、曲線 OP を曲線 QR に移動させる(矢印 II)。属性については、2. で述べた目的を達成するために、表-1 に示す 9 つの属性を考えることとした。各属性についての定式化は以下のようになる。

- 属性  $X_1 \sim X_4$  について

供用年数時の安全性余裕度として、劣化予測の不確定性を考慮し、次式で評価する。

$$X_i = (\mu_{F_{X_i}(t_{limit})} - F_{limit}) / \sigma_{F_{X_i}(t_{limit})} \quad (2)$$

$X_i \geq x_{limit}$  であり、 $\mu_{F_{X_i}(t_{limit})}$ ,  $\sigma_{F_{X_i}(t_{limit})}$  は供用年数  $t_{limit}$  時での安全性の期待値と標準偏差、 $F_{limit}$  は安全性限界値を示す。安全性の標準偏差は、過去の実橋試験結果に基づいて、0.15 とした。また、 $x_{limit}$  の設定は検討が必要であるが、今回は、 $x_{limit} = 1$  (84.1%信頼性限界)とした。

- 属性  $X_5 \sim X_7$  について

$$X_i = r_n = P_n / P'_m \quad (n = A, B, C) \quad (3)$$

ここで、 $r_n$  は  $n$  桁の  $P'_m$  に対する補強量 ( $0\% \leq r_n \leq 100\%$ )、 $P'_m$  は  $n$  桁の圧縮縁において引張応力を生じないプレストレス量、 $P_n$  はプレストレス量を示す。

- 属性  $X_8 \sim X_9$  について

$$X_i = \left| 1 - (EI)_B / (EI)_m \right| \quad (m = A, C) \quad (4)$$

ここで、 $(EI)_m$  は  $m$  桁の曲げ剛性を示す。

単属性効用関数はリスク回避性を考慮して、指数型効用関数を用いる。各単属性効用関数より、式(1)を用いて、多属性効用関数を作成することができ、その最大値を求めることにより、最適な補強対策を得ることができる。なお、本手法では、属性値の不確実性は無視できると仮定する。

本手法では補強時期を数期間にわけ、各期間での最適な補強対策を見つけ出す。そして、各補強期間での結果をもとに、最適な補強期間を算定することとする。具体的には以下ようになる。  
段階 1: 各補強時期  $t_i$  での最適補強量 ( $P^{t_i}_{Aopt}$ ,  $P^{t_i}_{Bopt}$ ,  $P^{t_i}_{Copt}$ ) を算出する。

段階 2: 段階 1 の結果より  $\left[ (P^{t_i}_{Aopt} + P^{t_i}_{Bopt} + P^{t_i}_{Copt}) \rightarrow Min \right]$  となる補強時期  $t_{Ropt}$  を算出する。

このようにして、最適補強対策 ( $t_{Ropt}$ ,  $P_{Aopt}$ ,  $P_{Bopt}$ ,  $P_{Copt}$ ) を得る。最適化を 2 段階で行う理由としては、補強時期は 1 橋だけに着目した場合、上述のように算出できると考えられるが、限られた予算内で数多くの橋梁に対して補強を行うことになれば、補強時期の決定要因は、本手法で取り上げた属性のみでは判断できないと考えられる。そこで、本研究の将来性を考え、2 段階とした。

### 3.3 遺伝的アルゴリズムによる最適化[5]

本研究での最適化には、最も基本的な遺伝的アルゴリズム(GA)のアルゴリズムとされている単純 GA を用いる。最適化問題として定式化すると、目的関数および制約条件は次のようになる。

- 目的関数:  $u(x_1, \dots, x_9) = \frac{1}{k} \left( \prod_{i=1}^9 [1 + k k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \rightarrow \text{Max} \quad (5)$

- 制約条件:  $X_i \geq x_{limit} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (6)$

$$0 \leq r_n \leq 1 \quad (n = A, B, C) \quad (7)$$

表-1 属性

		属性
①	$x_1$	供用年数時における曲げ安全性余裕度 (A 桁)
	$x_2$	供用年数時における曲げ安全性余裕度 (C 桁)
	$x_3$	供用年数時におけるせん断安全性余裕度 (A 桁)
	$x_4$	供用年数時におけるせん断安全性余裕度 (C 桁)
②	$x_5$	補強量 (A 桁)
	$x_6$	補強量 (B 桁)
	$x_7$	補強量 (C 桁)
③	$x_8$	中桁に対する A 桁の剛性バランス ( $(EI)_B / (EI)_A$ )
	$x_9$	中桁に対する C 桁の剛性バランス ( $(EI)_B / (EI)_C$ )

本手法では、各主桁の補強割合  $r_n$  を決定する。GA に適用するには、これらを遺伝子列として表現しなければならない。本研究では、各補強割合を 2 進数としてコーディングした。

#### 4. 実橋への適用

##### 4.1 橋梁概要および諸条件

対象とする橋梁は、橋齢 41 年、3 主桁で横桁を有する RC 単純 T 桁橋である。材料試験結果を表-2 に示す。表に示されるように、圧縮強度、弾性係数は全体的に小さい値をとっておりそのばらつきも、変動係数にして約 20%~40%と、設計時に考慮される変動係数約 10%に比べて非常に大きい。特に、主桁 B における劣化の進行状況は非常に大きいものとなっている。このことは、外桁への断面力の集中により A 桁の安全性が問題になることを示している。安全性評価および経年劣化予測[1, 2]を行った結果、この橋梁は橋齢 61 年で A 桁のせん断安全性が安全性限界を下回ることが分かっている。よって、橋齢 61 年までに何らかの補強対策を行う必要がある。この橋梁に対し、本手法を適用し、供用期間中の安全性を確保することとする。なお、供用年数は 75 年とする。本手法の実橋への適用にあたり、まず、補強期間を表-3 のように 5 年区切りの 3 期間に設定する。多属性効用関数の作成にあたっては、属性のリスク回避性を示す定数  $\gamma_i$  と、各属性の重要度を示す定数  $k_i$  を決定する必要がある。リスク回避性の変化は最適化結果にほとんど影響を及ぼさないことがわかっている。そこで本研究においては  $\gamma_i = 1 (i=1, \dots, 9)$  として行うことにした。また、定数  $k_i$  については、維持管理を行う主体の意図を反映できる指標となっている。ここでは各属性が同等の重みを持つことにし、 $k_i = 0.1 (i=1, \dots, 9)$  として行うこととした。これより、 $k = 0.261$  となる。これらのパラメータについては、今後、さらに検討を行っていく必要がある。GA に関する諸数値は世代数 200、個体数 200、交差率 0.3、突然変異率 0.01 とする。本研究では、予備的な数値実験試行に基づいて決定した[5]。

##### 4.2 数値実験および考察

本手法を実橋に適用した結果を表-4, 5 に示す。表-4 には各補強時期において総効用値が最大となるときの効用値、総効用値が示されている。表-5 には、各補強時期における主桁の最適なプレストレス量を示す。これより、本橋梁に対する最適な補強時期は、I (42.5 年~47.5 年) であることが分かる。言い換えれば、本橋梁のような橋齢、劣化程度および主桁間でのばらつきが比較的大きい橋梁に対しては、できる限り早い時期に補強を行うほど補強量が小さいということがいえる。図-4 に A 桁のせん断に対する補強

前後の経年劣化曲線を示しておく。しかしながら、一般的には、より橋齢の若い橋梁や劣化状態の異なる橋梁に対して本手法を適用し、最適な補強時期の存在の有無について検討を行う必要がある。

表-2 材料試験結果

主桁	圧縮強度(MPa)	弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
A	10.54(4.06)	16.86(2.35)
B	9.55(1.81)	9.12(5.00)
C	11.37(3.67)	13.04(1.76)

( )内は標準偏差

表-3 補強期間

補強期間	期間(年)	代表年(年)
I	42.5~47.5	45
II	47.5~52.5	50
III	52.5~57.5	55

表-4 効用値・総効用値

	I	II	III
$u_1(x_1)$	0.264	0.226	0.618
$u_2(x_2)$	0.524	0.493	0.542
$u_3(x_3)$	0.996	0.980	0.987
$u_4(x_4)$	0.998	0.978	0.999
$u_5(x_5)$	0.305	0.220	0.086
$u_6(x_6)$	0.797	0.776	0.820
$u_7(x_7)$	0.726	0.668	0.669
$u_8(x_8)$	0.426	0.394	0.358
$u_9(x_9)$	0.579	0.545	0.508
$u(x_1, \dots, x_9)$	0.599	0.561	0.595

表-5 各補強期間の最適な補強量

	I	II	III
A 桁	$1.30 \times 10^6$ (78.6%)	$1.42 \times 10^6$ (85.0%)	$1.59 \times 10^6$ (94.4%)
B 桁	$5.95 \times 10^6$ (29.9%)	$6.75 \times 10^6$ (32.6%)	$5.89 \times 10^6$ (27.0%)
C 桁	$6.79 \times 10^6$ (38.6%)	$7.98 \times 10^6$ (45.1%)	$8.06 \times 10^6$ (45.0%)
計	$2.57 \times 10^6$	$2.89 \times 10^6$	$2.99 \times 10^6$

単位 : kN

策に及ぼす影響を検討する。表-6に、目標供用年数とそれに対する各主桁の補強量を示す。ただし、補強時期はIとした。この表より目標供用年数が70年より小さい場合、中桁のみを補強し、主桁間の剛性バランスを改善させる補強対策が有効であることが分かる。これは、主桁間の剛性バランスを改善させることにより、劣化の進行を遅らせる効果を期待した対策となっている。

しかし、目標供用年数が70年より大きくなった場合、剛性のバランスのみでは供用期間の安全性を保証できなくなるため、耐荷力自体を向上させる補強対策が選択されるようになる。また、目標供用年数が大きいとき、B桁の補強量は約30%で停滞するが、この値はプレストレスにより全断面が有効となる補強量である。本橋梁の場合、A桁の補強量が大きくなっているが、これは最も断面力が集中する劣化の小さい桁への耐力補強が重要となる可能性を示している。しかし、A桁の剛性は大きいものの圧縮強度はC桁を下回り、そのばらつきも大きい。これが、最適補強対策に影響を及ぼしている可能性がある。この点に関しては、今後検討を必要とする。

### 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1)最適維持管理における考え方として、目標供用期間を予め設定した上で補強量ができる限り少なくなるような最適補強時期を選定することを目標として取り上げ、同時に主桁間剛性バランスを改善することを考慮するものとした。その具体的手法として多属性効用理論を適用し、同一指標での多目的最適化問題として定式化し、遺伝的アルゴリズムによる解析方法を提案した。
- (2)本手法を橋齢41年の劣化程度と主桁間でのはらつきがかなり大きい実橋に適用し、補強計画シミュレーションを試みた。その結果、本橋に対しては補強時期が早いほど補強量が少ないということが分かった。また目標供用年数を小さく設定した場合、最も劣化の激しい中桁のみを補強してバランスを改善させるという補強対策を得たが、目標供用年数を増加させると、そのみではなく、耐荷力自体を向上させる補強対策が重要となることがわかった。

今後の課題としては、安全性余裕度の限界値の設定、多属性効用関数における各属性の重要度の設定などを適切に行うとともに、より橋齢の若い橋梁やより健全な橋梁に本手法を適用し、最適補強時期や供用期間の増大に関する検討を行う必要がある。また、今回は疲労などによる材料劣化のみを対象としたが他の劣化（塩害・アルカリ骨材反応等）は別の要因により検討を行う必要があり、今後更なる検討が必要である。

### 参考文献

- [1]宮本文徳、森川英典、石田弘弘：統計データに基づく不確定性を考慮した既存コンクリート橋の安全性評価、土木学会論文集、No.472/V-20, pp.49-58, 1993.8
- [2]森川英典、宮本文徳、竹内和美：統計解析に基づく既存コンクリート橋の安全性および寿命評価、土木学会論文集、No.502/V-25, pp.53-62, 1994.11
- [3]大山慎一、北村敦彦、森川英典、宮本文徳：損傷劣化特性を考慮したコンクリート橋安全性の統計的予測、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第5部、pp.180-181, 1994.9
- [4]F.N.Pannell：The ultimate moment of resistance of unbonded prestressed concrete beams, Magazine of concrete research, Vol.21, No.86, pp.43-54, Mar. 1969
- [5]片山憲一、河合優、森川英典：既存コンクリート橋の最適維持管理手法における遺伝的アルゴリズムの適用、土木学会関西支部年次学術講演概要、1997.5

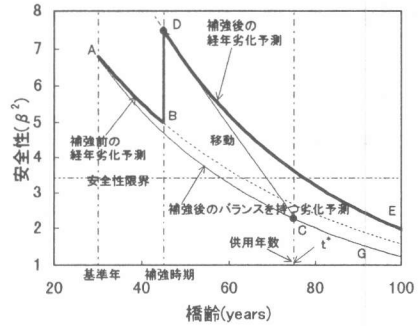


図-4 補強前後の経年劣化曲線(A桁せん断)

表-6 目標供用年数による最適補強量の変化

目標供用年数(年)	A桁 (%)	B桁 (%)	C桁 (%)
62	0.0	6.7	0.2
64	0.5	14.5	0.0
66	0.2	20.3	0.2
68	0.6	27.7	1.6
70	50.1	26.7	0.2
72	58.4	32.2	6.5
74	71.5	32.8	29.4
76	86.5	29.1	45.3