

論文 塩害劣化RC橋の安全性評価と外ケーブル補強の最適化に関する検討

岡本 早夏*1・森川 英典*2・菊田 亮一*3

要旨：多主桁のRC橋梁において、塩害による劣化を生じると安全性の低下が桁ごとに不均一で複雑な状態となる。本研究では、このようなRC橋梁の安全性を改善するため、外ケーブルによる補強を考慮し、多属性効用理論と遺伝的アルゴリズムを用いて橋梁構造系としての最適な補強をするための手法について検討を行った。

キーワード：外ケーブル工法, 塩害劣化, RC橋, 最適補強, 多属性効用理論

1. はじめに

多主桁RC橋においては、塩害による劣化進行が部材毎に異なることが考えられ、構造安全性の不均一な状態が生じる¹⁾。このような橋梁に対して、所要の要求を満たすように、合理的な補強対策を講じるためには、補強による構造安全性の変化に着目した補強の最適化検討が必要である。本研究では、塩害による劣化を生じたRC橋の安全性を改善するため、外ケーブルによる補強を対象として、まず、最適補強の概念と目標を整理した上で多属性効用理論と遺伝的アルゴリズムGAを用いて最適化計算を行い、その特性について検討を行った。

2. 塩害ならびに外ケーブルによる補強効果を考慮した安全性評価

2.1 対象橋梁概要

対象とする橋梁は、支間長13mの3主桁RC単純T桁橋であり、海岸線に対して平行に架設された塩害環境にある。各桁の諸元を表-1に、対象橋梁の断面を図-1に示す。詳しい塩害劣化のモデル化、安全性評価等については川本らの研究¹⁾を参考とし、結果のみ図-2に示す。図中に示す $\beta=2.08$ は既往の研究²⁾において、補修、補強を施すべき限界値として提案されている

値である。ここから推測すると橋齢17年までに、何らかの対策が必要であると考えられる。本研究では、10年もしくは15年のいずれかで外ケーブルを用いた補強を行うこととした。

表-1 各桁の諸元および初期条件

	A桁	B桁	C桁
かぶり (mm)	50	50	50
表面塩化物イオン濃 (kg/m ³)	3.0	2.0	1.5
コンクリート強度 (N/mm ²)	20	30	30
コンクリート弾性係 (kN/mm ²)	16	21	21
W/C (%)	74	57	57
鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	294		
鉄筋断面積 (mm ²)	主鉄筋	8620	
	スターラップ	127.2	
スターラップ間隔 (mm)	300		

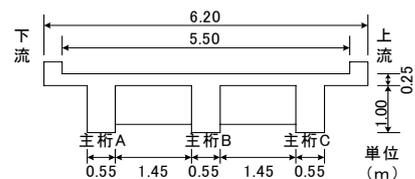


図-1 対象橋梁断面図

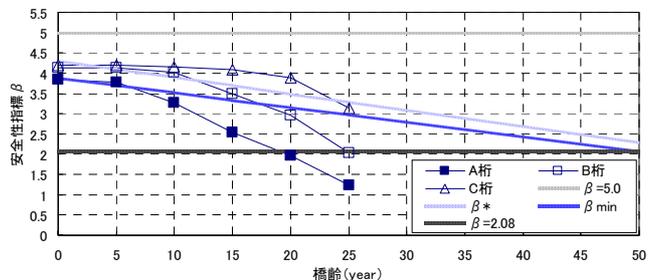


図-2 目標値の変化と経年による安全性指標 β の低下

*1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻（正会員）

*2 神戸大学 工学部建設学科助教授 工博（正会員）

*3 神戸大学 工学部建設学科

2.2 補強後の曲げ耐荷力算定

本研究においては、睦好らによって提案された外ケーブル PC の曲げ耐荷力算定法³⁾を用いて、供用開始から10年時と15年時における曲げ耐荷力を評価した。また、ばらつきを考慮する要因として、主鉄筋降伏強度、緊張材応力に着目した。

断面力評価は、はりモデルによる格子桁モデル(図-3)を用いて、モンテカルロシミュレーション(試行回数 5000 回)により不確定性を考慮して行った。補強効果を考慮した断面力解析を行うにあたり、桁の下縁、上縁で引張応力を生じないプレストレス量 P_t , P_t' となったとき、桁高の15%までひび割れが入った状態 I_{max} まで断面2次モーメントが回復すると仮定した。

(図-4)

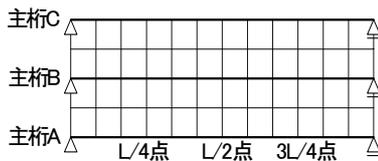


図-3 解析モデル(平面図)

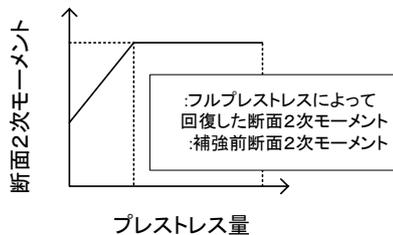


図-4 断面2次モーメントの回復

2.3 補強後の安全性向上の評価

補強後の耐荷力と断面力を用いて、補強による安全性向上の評価を行う。補強時の導入プレストレス量の組合せとして、A, B, C 桁それぞれに対して P_0 , P_t , P_t' が考えられ、表-2 に示す 27 ケースについて安全性評価を行った。ここで P_0 はプレストレスゼロであり、無補強を示す。15 年時における補強後の安全性指標 β を表-3 に示す。同じ補強率でも、桁の状態が異なるため、安全性向上量に差が出ることが分かる。

表-2 補強後の安全性評価組合せ

	A桁		B桁		C桁	
Case1	P_0	I_{now}	P_0	I_{now}	P_0	I_{now}
Case2	P_0	I_{now}	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}
Case3	P_0	I_{now}	P_0	I_{now}	P_t'	I_{max}
Case4	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}
Case5	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case6	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case7	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}
Case8	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case9	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case10	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}	P_0	I_{now}
Case11	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}
Case12	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}	P_t'	I_{max}
Case13	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}
Case14	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case15	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case16	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}
Case17	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case18	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case19	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}	P_0	I_{now}
Case20	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}	P_t	I_{max}
Case21	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}	P_t'	I_{max}
Case22	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}
Case23	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case24	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case25	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_0	I_{now}
Case26	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}
Case27	P_t	I_{max}	P_t	I_{max}	P_t'	I_{max}

表-3 補強後の安全性指標 β (15 年睦好式)

	A桁	B桁	C桁
Case1	3.59	3.48	3.59
Case2	3.82	3.77	5.91
Case3	3.82	3.77	6.99
Case4	3.83	5.94	3.88
Case5	4.09	6.35	6.31
Case6	4.09	6.35	7.39
Case7	3.83	7.02	3.88
Case8	4.09	7.44	6.31
Case9	4.09	7.44	7.39
Case10	5.72	3.65	3.76
Case11	6.14	3.94	6.31
Case12	6.14	3.94	7.39
Case13	6.15	6.19	4.05
Case14	6.49	6.56	6.51
Case15	6.49	6.56	7.59
Case16	6.15	7.27	4.05
Case17	6.49	7.65	6.51
Case18	6.49	7.65	7.59
Case19	6.83	3.65	3.76
Case20	7.26	3.94	6.31
Case21	7.26	3.94	7.39
Case22	7.27	6.19	4.05
Case23	7.62	6.56	6.51
Case24	7.62	6.56	7.59
Case25	7.27	7.27	4.05
Case26	7.62	7.65	6.51
Case27	7.62	7.65	7.59

2.4 補強による安全性向上量算定

膨大な組合せの対策が考えられる外ケーブルによる補強での最適化を行うため、代表的な組合せ(表-4)におけるプレストレス量と補強後の安全性向上量との関係を重回帰分析により求め、補強の最適化演算に適用した。

ここで得られる定数は、各主桁の安全性向上に対する補強の感度を表す係数となることから、補強感度係数と称することとする。

$$\delta\beta^2 = a\gamma_A + b\gamma_B + C\gamma_C + d \quad (1)$$

ここで、 $\delta\beta^2$:安全性向上量,

$\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$: A, B, C 桁それぞれの補強率

表-5 は、表-3 から求めた補強感度係数である。表中の I, II は導入プレストレス量の分類で、導入されるプレストレス量を P とすると、I: $P_0 \leq P \leq P_t$, II: $P_t < P \leq P_t'$ である。安全性のアンバランスをできる限り細かく調整するため、導入プレストレス量は連続量とした。

表-4 断面2次モーメントの組合せ

	A桁	B桁	C桁
Case1	I_{now}	I_{now}	I_{now}
Case2	I_{now}	I_{now}	I_{max}
Case3	I_{now}	I_{max}	I_{now}
Case4	I_{now}	I_{max}	I_{max}
Case5	I_{max}	I_{now}	I_{now}
Case6	I_{max}	I_{now}	I_{max}
Case7	I_{max}	I_{max}	I_{now}
Case8	I_{max}	I_{max}	I_{max}

表-5 補強感度係数 (15年)

		a	b	c	d
I	A桁	36.900	5.156	5.081	-1.485
I	B桁	3.361	39.359	5.514	-1.081
I	C桁	4.041	4.548	38.761	-0.969
I	A桁	39.139	5.039	0.000	1.084
I	B桁	3.267	41.434	0.000	1.779
II	C桁	6.473	6.216	40.318	-3.251
I	A桁	39.154	0.000	4.962	1.185
II	B桁	4.964	41.768	8.386	-4.046
I	C桁	3.119	0.000	39.882	1.900
I	A桁	40.976	0.000	0.000	3.769
II	B桁	4.672	43.132	0.000	0.246
II	C桁	4.403	0.000	41.318	0.590
II	A桁	39.400	8.130	8.092	-4.953
I	B桁	0.000	40.539	5.423	0.653
I	C桁	0.000	3.662	40.632	1.231
II	A桁	40.775	7.559	0.000	-0.745
I	B桁	0.000	42.431	0.000	3.485
II	C桁	0.000	4.227	41.197	0.690
II	A桁	40.778	0.000	7.510	-0.632
II	B桁	0.000	42.426	8.100	-1.416
I	C桁	0.000	0.000	40.793	3.546
II	A桁	42.062	0.000	0.000	3.095
II	B桁	0.000	43.774	0.000	2.617
II	C桁	0.000	0.000	41.916	2.833

3. 最適補強の定義

本研究における最適補強の検討は、多属性効用理論とGAに基づき行う。最適化の考え方を次のように定義する。

- ① 目標とする安全性の最低限確保
- ② 各主桁のプレストレス量(補強量)最小
- ③ 各主桁間の剛性のバランスの改善

①に示す安全性の目標値 β^* は、IS013822に規定された目標信頼性基準値($\beta=2.3\sim 4.3$)を参考とし、供用開始時 $\beta=4.3$ 、予定供用終了時 $\beta=2.3$ を確保し、その間線形変化することとした。供用開始 t 年における目標値 β^* は、次式により表される。

$$\beta^* = 4.3 - 0.04 \times t \quad (2)$$

図-2に予定供用期間50年における目標値 β^* の経年変化を併せて示す。

4. 多属性効用理論による最適補強決定手法

4.1 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。これにより評価目標の各属性を単属性効用関数として数学的にモデル化できる。本研究では、次式のような指数関数型の効用関数を用いた。

$$u(x) = a + be^{-\gamma x} \quad \gamma \geq 0 \quad (3)$$

ここで、 γ :リスク回避性の大きさを表す係数、 a, b :正規化定数

ある補強対策 a_i に対して、結果が単属性効用で与えられるなら、 a_i の期待効用は次式で与えられる。

$$E(U_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) f_X^i(x) dx \quad (4)$$

ここで、 $u(x)$:補強対策 a_i の結果 X についての効用関数、 f_X^i : $u(x)$ の確率密度関数

式(4)は複数の属性を持つ多目的決定問題に一般化することができる。この場合、補強対策 a_i の期待効用は多次元の確率密度関数を用いて次式のように表される。

$$E(U_i) = \int_{x_1} \cdots \int_{x_n} u(x_1, \dots, x_n) f_{X_1 \dots X_n}^i(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n \quad (5)$$

ここで、 $u(x_1, \dots, x_n)$:補強に関連した n 個の属性値の確率変数 X_1, \dots, X_n に関する結合効用関数、 $f_{X_1 \dots X_n}^i(x_1, \dots, x_n)$:同時確率密度関数

これらの結合効用関数および同時確率密度関数を決定するには、条件付効用関数と条件付確率密度関数を求める必要があるが、一般的には、①統計的独立性②選考独立③効用独立の三つの仮定を設けることにより簡単化できる⁴⁾。

まず、仮定①より式(5)は次式のように変形される。

$$E(U_i) = u(x_1, \dots, x_n) \quad (6)$$

仮定②③より結合効用関数は次式で表される。

$$u(x_1 \cdots x_n) = \frac{1}{k} \left(\prod_{i=1}^n [1 + k k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \quad (7)$$

ここで、 $k, k_i (i=1, \dots, n)$ は定数で、 $u_i(x_i)$ は各属性の周辺単属性効用関数である。したがって、個々の単属性効用関数が求まれば、 $k_i u_i(x_i)$ の互いのスケールを決めて結合することにより、多属性効用関数を求めることができる。

4.2 各属性の定式化

本研究においては補強の最適化を3で述べた3つの目的を満足させることと考え、それらに関する属性を表-6に示す8つを定義し、以下のように定式化した。

① 最低限の安全性確保： $X_1 \sim X_3$

$$X_i = \theta_i^2 + \rho(\theta_i) \quad (8)$$

$$\theta_i = \frac{\beta'(t) - \beta^*(t)}{\beta_{\max}(t) - \beta^*(t)} \quad (9)$$

$$\rho(\theta_i) = -\rho \cdot \theta_i \quad (\beta'(t) < \beta^*(t))$$

$$\rho(\theta_i) = 0 \quad (\beta^*(t) < \beta'(t) < \beta_{\max}(t))$$

$$\rho(\theta_i) = -\rho \cdot (\theta_i - 1) \quad (\beta_{\max}(t) < \beta'(t))$$

ここで、 t : 補強年、 $\beta'(t)$: 補強後安全性 β' 、 $\beta^*(t)$: t 年時の β 目標値、 $\beta_{\max}(t)$: β 上限値、 $\beta_{\min}(t)$: β 下限値、 $\rho(\beta'(t))$: ペナルティ関数

ペナルティ関数は、実行可能領域外の値に対してペナルティを課すことにより、制約条件を付与するためのものである。本研究では、 $\beta_{\max}(t)$ を超える場合を過補強、 $\beta_{\min}(t)$ を下回る場合を補強量不足、図-5に示すように $\beta = \beta^* \sim \beta_{\max}$ を実行可能領域、 $\beta = \beta_{\min} \sim \beta^*$ を許容領域としてペナルティ関数を適用した。 $\beta'(t) = \beta^*(t)$ のとき、最良値 $X_i = 0.0$ 、 $\beta'(t) = \beta_{\min}(t)$ または $\beta_{\max}(t) = \beta'(t)$ のとき最悪値 $X_i = 1.0$ を示すように、係数 ρ を以下の式により決定した。また、過補強・補強量不足については、最悪値 $X_i = 1.0$ を取るものとした。

$$\rho = \frac{(\beta_{\max}(t) + \beta_{\min}(t) - 2 \cdot \beta^*(t))(\beta_{\max}(t) - \beta_{\min}(t))}{(\beta_{\max}(t) - \beta^*(t))(\beta_{\min}(t) - \beta^*(t))} \quad (10)$$

$\beta_{\max}(t) = 5.0$ 、 $\beta_{\min}(t) = \beta^*(t) \times 2.08/2.3$ とし、供用期間終了時に $\beta_{\min}(t) = 2.08$ を確保することとした。

表-6 属性

①	X_1	安全性確保 (A 桁)
	X_2	安全性確保 (B 桁)
	X_3	安全性確保 (C 桁)
②	X_4	補強量 (A 桁)
	X_5	補強量 (B 桁)
	X_6	補強量 (C 桁)
③	X_7	A 桁に対する B 桁の剛性比
	X_8	A 桁に対する C 桁の剛性比

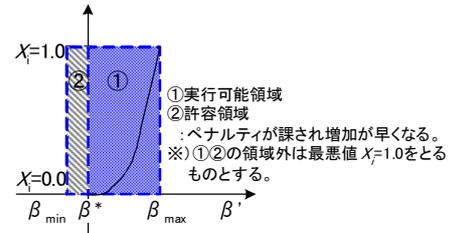


図-5 ペナルティ関数を適用した属性値

② 補強量最小： $X_4 \sim X_6$

$$X_i = r_j = \frac{P_j}{P'_j t_j} \quad (j=A, B, C) \quad (11)$$

ここで、 $r_j (0 \leq r_j \leq 1.0)$: 桁 j のプレストレス割合、 P_t : プレストレス量、 P'_j : 桁 j の圧縮縁において引張応力が生じない限界プレストレス量

③ 剛性バランスの改善： $X_7 \sim X_8$

$$X_i = \left| 1 - \frac{(EI)_A}{(EI)_m} \right| \quad (m=B, C) \quad (12)$$

ここで、 $(EI)_m$: m 桁の剛性

4.3 最適化手法

各属性に関する結合効用関数が求められると、本研究における最適補強の決定問題はこの効用値が最大となる補強時期と各属性値の組み合わせを求めるという最適化問題に帰着する。

しかしながら、多数の属性値を同時に最適化演算に考慮することは、局所解への停留の可能性が大きくなる。そこで、本研究では最適化演算手法として GA を用いることで、局所解への停留を回避した。また、実際の補強時期については、他の要因から制約を受けることも多く、本研究では、補強時期をあらかじめ 10 年と 15 年と設定しておき、各期間での最適な補強対策を演算により求め、その結果の比較検討をもとに最適な補強計画を決定することとした。

最適化問題における目的関数および制約条件の定式化を以下に示す。

●目的関数：

$$u(x_1, \dots, x_N) = \frac{1}{k} \left(\prod_{i=1}^N [1 + k k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \rightarrow \max \quad (13)$$

●制約条件： $x_i \geq x_{i\text{limit}}, 0 \leq r_n \leq 1$

上記の最適化問題で、各桁の補強率 r_j を決定することとなる。本研究では、各主桁の補強率を2進法としてコーディングした。

5. 最適補強の検討

多属性効用関数の評価にあたっては、各属性のリスク回避性 γ_i と各属性の重要度を示す係数 k_i を決定する必要がある。このケースでは、リスク回避性を大きくするほうが、補強後の安全性を確保しやすいことが分かった。そこで、効用関数は図-6 に示す $\gamma_i = 3.0$ の凸関数とした。また、係数 k_i については、各属性の優先度を表す指標となっている。このケースでは、最低限の安全性確保が最も優先順位が高いと考え、 $k_1 \sim k_3 = 0.40$, $k_4 \sim k_6 = 0.05$, $k_7 \sim k_8 = 0.10$ とした。これにより、 $k = -0.724$ となる。上記のパラメータの取るべき値については、対象橋梁、維持管理の考え方等により検討を行う必要がある。以上により、結合効用関数が次式のように求められた。

$$u(x_1, \dots, x_N) = -\frac{1}{0.724} \left(\prod_{i=1}^N [1 - 0.724 k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \quad (14)$$

次に、GA を適用する際のパラメータ(世代数、個体数、交差率、突然変異率)については、既往の研究⁵⁾を参考に、世代数 200、個体数 200、交差率 0.3、突然変異率 0.01 とした。1000 世代における収束過程を図-7 に示す。これより、200 世代においてほぼ収束しているといえる。

表-7 に最適化演算の結果得られた各属性値の効用値と結合効用値の最終的な収束値を示す。補強時期 10 年の総効用値 U が、15 年よりも大きくなっている。また、表-8 に最適解における補強率と補強後の安全性指標の値および

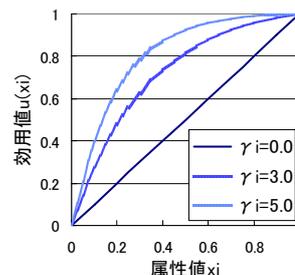


図-6 リスク回避性による効用値の遞減

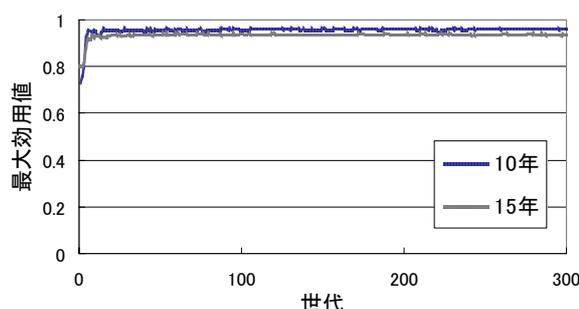


図-7 GA の収束性

表-7 最大効用時の各属性効用値

	$u_1(x_1)$	$u_2(x_2)$	$u_3(x_3)$	$u_4(x_4)$	$u_5(x_5)$	$u_6(x_6)$	$u_7(x_7)$	$u_8(x_8)$	U
10年	0.999	0.986	0.858	0.583	1.000	1.000	0.894	0.861	0.961
15年	0.999	0.987	0.744	0.464	0.904	1.000	0.901	0.821	0.938

表-8 各補強時期における最適な補強率

および補強後の安全性指標

	補強率(%)			安全性指標 β'			剛性 ($\times 10^{15}$ kN \cdot mm ²)		
	A桁	B桁	C桁	A桁	B桁	C桁	A桁	B桁	C桁
10年	16.8	0.0	0.0	3.92	3.97	4.14	1.747	1.798	1.815
15年	23.7	3.2	0.0	3.73	3.62	4.10	1.722	1.770	1.815

剛性を示す。補強時期 10 年、15 年とも安全性指標の下限值 ($\beta_{\text{min}} = 3.53, 3.35$) を確保できた。また、10 年時においては、全桁とも目標安全性 $\beta^* = 3.9$ を確保している。しかし、15 年時において、劣化のあまり激しくない B 桁の安全性が目標安全性 $\beta^* = 3.7$ をわずかに下回った。より劣化程度の大きい A 桁は、他の桁に比べてより多い補強量が必要とされる。しかし、表-2、表-3 case10, case19 より、A 桁のみに P_r, P_r' を導入しても B 桁の安全性は β^* を確保できない。B 桁の安全性が β^* を確保するためには、B 桁の補強量をより多くする必要があると考えられる。これより、補強時期 10 年のほうが 15 年と比べて、少ない補強量でより効率的に補強を行うことができることが分かる。

A桁のみの補強では、全桁の β^* が確保されない程度まで劣化の進行した補強時期 15 年時において、剛性バランスの改善を考えない場合、他の最適解が導かれる可能性がある。そこで、4.2 で示した属性のうち、 $X_1 \sim X_6$ のみを考慮し、補強時期 10 年、15 年とも最適化を行った。結合関数は次式のように求められた。

$$u(x_1, \dots, x_N) = -\frac{1}{0.598} \left(\prod_{i=1}^N [1 - 0.598k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \quad (15)$$

表-9、表-10 に最適化演算の結果を示す。総効用値は、剛性のバランス改善を考慮した場合とほぼ同じ値となった。補強率は、剛性バランスを考慮した場合と比較して小さくなっている。しかし、補強時期 10 年、15 年とも、補強後の安全性指標が β_{\min} を確保できているが、 β^* を確保できておらず、安全性確保の余裕が小さいといえる。これは、剛性のバランスの改善を要求しないことにより、安全性指標が β_{\min} を確保できた時点で演算が終了することによるものである。

以上、4つのケースのうち、10年時に剛性バランスの改善を考慮するケースの総効用値が最も大きな値となり、安全余裕の面からも望ましいといえる。外ケーブルによる補強は、ケーブルの設置費用が大きな割合を占める。そのため、この場合には、A桁のみにケーブルを設置する補強は経済的にみても最適な補強であると考えられる。

6. まとめ

以下に本研究で得られた知見についてまとめる。

(1) 最適補強の考え方として、目標供用年数、いくつかの補強時期を予め設定した上で、各時期において補強量ができる限り少なくなるような最適補強量を求めることを目標とし、同時に主桁間の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て同一尺度に基づく多目的最適化問題として定式化し、遺伝的アルゴリズム(GA)による演算法の適用を提案した。

表-9 最大効用時の各属性効用値

	$u_1(x_1)$	$u_2(x_2)$	$u_3(x_3)$	$u_4(x_4)$	$u_5(x_5)$	$u_6(x_6)$	U
10年	.998	.987	.860	.601	1.000	1.000	.959
15年	.998	.997	.745	.483	.878	1.000	.931

表-10 各補強時期における最適な補強率

および補強後の安全性指標

	補強率(%)			安全性指標 β'			剛性($\times 10^{15}$ kN \cdot mm 2)		
	A桁	B桁	C桁	A桁	B桁	C桁	A桁	B桁	C桁
10年	15.9	0.0	0.0	3.87	3.97	4.14	1.735	1.798	1.815
15年	22.5	4.1	0.0	3.67	3.66	4.10	1.706	1.788	1.815

(2) 本手法を塩害劣化 RC 橋に適用した結果、補強時期が早いほど補強量が少なくなる結果となった。また、剛性バランスの改善を考慮しない場合についても最適化を行った結果、補強量はより小さくなった。しかし、安全性確保に対する余裕が小さくなり、主桁間の剛性のバランスも改善されにくい結果となった。この場合には、早い時期に A 桁のみに補強し、剛性バランスの改善を図ることが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 川本祐子, 森川英典: 塩害による鉄筋腐食を考慮したコンクリート橋の劣化進行予測と安全性評価, 土木学会関西支部年次学術講演会, pp. V-17-1~2, 2003
- 2) 森川英典, 宮本文穂, 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) 睦好宏史, 土田一輝, MATUPAYONT Songkiat, 町田篤彦: 外ケーブル PC 部材の曲げ性状および曲げ耐力算定法に関する研究, 土木学会論文集, No. 508/V-26, pp. 67-77, 1995
- 4) A. H. Ang and W. H. Tang (伊藤學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三共訳) “土木・建築のための確率・統計の応用” (1998) 丸善
- 5) 森川英典, 片山憲一: 多属性効用理論に基づく劣化したコンクリート橋における最適補強の決定, 材料, Vol. 49, pp. 181-186, 2000. 2