

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

神戸大学大学院 学生員 ○岡本 早夏

神戸大学工学部 正会員 森川 英典

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と考えられ、構造安全性の不均一な状態が生じる。本研究では、塩害劣化 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に最適補強の概念と目標を整理し、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と結果の検討を行った。

2. 塩害劣化ならびに外ケーブル工法による補強効果を考慮した安全性評価

対象とする橋梁は既往の研究¹⁾²⁾の支間長 13m の RC 単純 T 桁橋モデル(表-1, 図-1)および安全性評価の結果(図-2)を用いた。図-2中に示す $\beta=2.08$ は、補修・補強を施すべき限界値として著者らによって提案されている値³⁾であり、本橋梁では橋齢 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、供用開始から 10 年、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、睦好らによって提案された外ケーブル PC の曲げ耐力力算定法⁴⁾を用いて曲げ耐力評価、および断面力評価を行った。断面力解析を行うにあたり、補強による断面 2 次モーメントは図-3 のように仮定し、断面 2 次モーメントの回復した状態 I_{max} は桁高の 15% までひび割れが入った状態とした。 P_t , P_t' は、それぞれ桁の下縁、上縁での引張応力を生じないプレストレス量である。

以上のように求めた耐力、断面力から補強後の安全性指標 β を算定し、代表的な組合せ(表-2)について安全性評価を行い(表-3)、各主桁の補強量に対する安全性向上量を重回帰分析により求め、本手法に適用した。

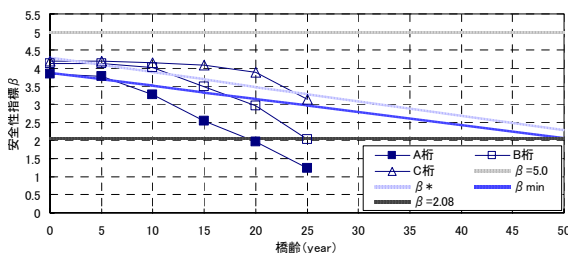
図-2 目標値安全性指標 β の経年変化

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 ²)	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		

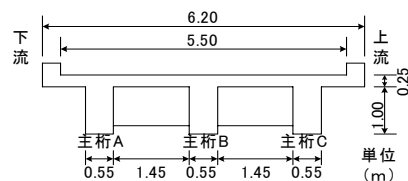


図-1 対象橋梁断面図

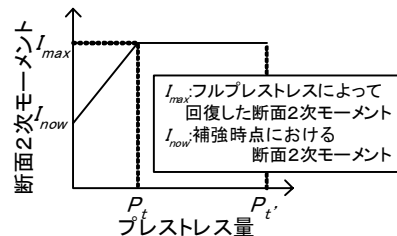


図-3 断面 2 次モーメントの回復

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}

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

	A 桁	B 桁	C 桁
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

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

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-6069

3. 外ケーブル工法による塩害劣化 RC 橋の最適補強の検討

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。最適化の目標として表-4 に示す属性を考慮し、最適化の考え方を『CASE I：最小の補強量で橋梁全体系のバランスを改善させ、目標とする安全性を確保する①～③』『CASE II：最小の補強量で目標とする安全性を確保する①～②』の二つの場合で定義した。安全性の目標値 β^* は、ISO13822 で提示された値を参考に、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とした。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。以上より、目的関数および制約条件を次のように定式化し、2 進法によりコーディングした各桁の補強率 x_j を求めることとした。

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

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

安全性確保については、 $\beta_{max}(t)=5.0$ 、 $\beta_{min}(t)=\beta^*(t) \times 2.08/2.3$ で供用期間終了時に $\beta_{min}(t)=2.08$ を確保するとし、ペナルティ関数を用いて次式により表した。 $\rho(\theta_i)$ はペナルティ関数で、実行可能領域外で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。

$$X_i = \theta_i^2 + \rho(\theta_i) \quad \theta_i = \frac{\beta'(t) - \beta^*(t)}{\beta_{max}(t) - \beta^*(t)} \quad (2)$$

表-5 に最適化演算の結果得られた各属性効用値と総効用値の最終的な収束値を、各補強時期における最適補強率および補強後の安全性指標を表-6 に示す。CASE I の補強時期 10 年の総効用値 U が最大で、CASE I・CASE II とも 10 年のほうが 15 年よりも U が大きくなった。CASE I では、10 年・15 年とも $\beta_{min}=3.53, 3.35$ を確保でき、10 年の場合は全桁とも $\beta^*=3.9$ を確保した。15 年の場合、劣化のあまり激しくない B 桁の安全性が $\beta^*=3.7$ 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_t, P_t' を導入しても B 桁の安全性は β^* を確保できない。B 桁が β^* を確保するためには、B 桁の補強量をさらに多くする必要がある。CASE II では、10 年・15 年とも β_{min} を確保できているが、劣化の進行した A 桁・B 桁の β^* が確保できなかった。このことから、10 年時に最も劣化の進行した A 桁のみに補強を行う計画が最も効率が良いと言える。

4. まとめ

多属性効用理論と遺伝的アルゴリズムを用い、塩害劣化 RC 橋の外ケーブル工法による補強の最適化を行った結果、本橋梁の場合には、早い時期に『最小の補強量で橋梁全体系のバランスを改善させ、目標とする安全性を確保する』ことを目的として補強を行うことで、より効率的な補強ができることが分かった。

参考文献 1) 菊田ら：関支部年講，2003，2) 川本ら：関支部年講，2003，3) 森川ら：材料，2000. 2，4) 睦好ら：土木学会論文集，1995

表-4 属性

①	x_1	安全性確保 (A 桁) $X_A = \theta_A^2 + \rho(\theta_A)$
	x_2	安全性確保 (B 桁) $X_B = \theta_B^2 + \rho(\theta_B)$
	x_3	安全性確保 (C 桁) $X_C = \theta_C^2 + \rho(\theta_C)$
②	x_4	補強量 (率) (A 桁) $r_A = \frac{P_A}{P'_{tA}}$
	x_5	補強量 (率) (B 桁) $r_B = \frac{P_B}{P'_{tB}}$
	x_6	補強量 (率) (C 桁) $r_C = \frac{P_C}{P'_{tC}}$
③	x_7	A 桁に対する B 桁の剛性比 $[(EI)_A / (EI)_B]$
	x_8	A 桁に対する C 桁の剛性比 $[(EI)_A / (EI)_C]$

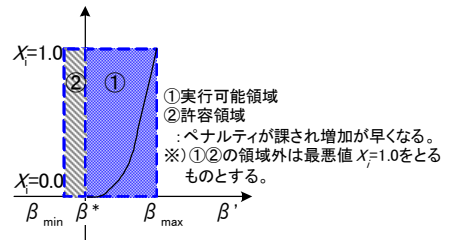


図-5 ペナルティ関数

表-5 最大効用時の各属性効用値

CASE I	$u_1(x_1)$	$u_2(x_2)$	$u_3(x_3)$	$u_4(x_4)$	$u_5(x_5)$	$u_6(x_6)$	$u_7(x_7)$	$u_8(x_8)$	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
CASE II	$u_1(x_1)$	$u_2(x_2)$	$u_3(x_3)$	$u_4(x_4)$	$u_5(x_5)$	$u_6(x_6)$			U
10 年	0.998	0.987	0.860	0.601	1.000	1.000			0.959
15 年	0.998	0.997	0.745	0.483	0.878	1.000			0.931

表-6 最大効用時の補強率，安全性指標および剛性

		補強率 (%)			安全性指標 β^*			剛性 ($\times 10^{15} \text{ kN} \cdot \text{mm}^2$)		
		A 桁	B 桁	C 桁	A 桁	B 桁	C 桁	A 桁	B 桁	C 桁
10 年	CASE I	16.8	0.0	0.0	3.92	3.97	4.14	1.747	1.798	1.815
	CASE II	15.9	0.0	0.0	3.87	3.97	4.14	1.735	1.798	1.815
15 年	CASE I	23.7	3.2	0.0	3.73	3.62	4.10	1.722	1.770	1.815
	CASE II	22.5	4.1	0.0	3.67	3.66	4.10	1.706	1.788	1.815

※数値： β_{min} を確保できているが、 β^* を確保できていない。