

関西大学総合情報学部 正会員 古田 均
 (株) きんでん 正会員○金森敦司
 関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき 近年、橋梁には経年に伴う老朽化が進行しており、その維持管理が極めて重要になりつつある。補修を必要とする橋梁の数が年々増加しているにもかかわらず、維持管理に当てられる予算は十分な状態ではない。

そこで、荷重を直接受け、橋梁の中でも損傷の著しいRC床版を対象に、限られた予算内で最大の便益が得られるように、補修工法のライフサイクルコスト（以下、LCCと称する）、対象橋梁の周辺状況、および道路網を勘案しながら、補修する橋梁と補修工法が適切に選定できる最適維持管理計画支援システムを遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm：GA）を用いて構築する。

2. RC床版の劣化度と健全度ランク RC床版の劣化損傷度の評価基準は、損傷の種類ごとに国の協会や団体によって独自に制定されている。松井らは、RC床版の使用限界状態までの損傷に対し、その劣化度 D_c をひび割れ密度 C_d により

$$D_c = C_d / 10.0 \quad (1)$$

から算定するように提案した。ここでも、この考えを踏襲し、RC床版の劣化度を算出する。

劣化度の評価値にもとづき、損傷したRC床版を劣化度別に分類したものは『損傷度』もしくは『健全度』などと呼ばれるが、ここでは劣化度をⅠ～Ⅴの5ランクに区分し、それを『健全度ランク』と呼ぶ。

3. RC床版の劣化予測 RC床版の耐力は、使用環境によっても異なるが、時間とともに低下し、使用限界状態を超過する危険度は増大する。ここでは、阪神高速道路公団での、遷移確率行列 P を用い、RC床版の劣化の進行度を予測する。ここに、行列 P の要素は、得られた健全度ランクが単位時間の経過後にそれより悪い健全度ランクに移行する確率を表している。現在の健全度ランクの状態ベクトルを列ベクトル $S(0)$ で表現すると、 n 年後の状態ベクトル $S_n(n)$ は、 P を用いて、次のように表される。

$$S_n(n) = P^n S(0) \quad (2)$$

RC床版が使用限界状態を超過する危険度は、以下のよう求められる。すなわち、 m 時点での危険度 $R(m)$ は、その時点での床版の状態 $S(m)$ によって次のように算出される。

$$R(m) = D^T S(m) + L^T P S(m) \quad (3)$$

$$S(m) = P^m S(0) \quad (4)$$

ここに、 D は危険度ベクトル、 L は限界危険度ベクトルで、

$$D = \{0, 0, 20, 40, 0\}^T \quad (5)$$

$$L = \{0, 0, 0, 0, 100\}^T \quad (6)$$

で与えられる。ただし、両ベクトルの要素は、健全度ランクⅤ、すなわち、床版の使用限界状態での健全度ランクを100の危険度とした場合の床版が別の健全度ランクに移行したことによる危険度を表す。また、式(4)での行列 P は、対象とする床版がこれまで使用限界状態に陥ったことはないという前提のもとに、行列 P を変更（健全度ランクⅤへの遷移分を健全度ランクⅣに戻した）したものである。

4. 目的関数の決定 本システムでは、橋梁の状態（橋梁の周辺環境、損傷の状態や原因）を加味し、またLCCを最小とする工法を13種類の補修工法メニューの中から選択する。上述の橋梁の状態への各工法の適応度を評価するが、周辺状況などは極めて曖昧で主観的な要因であるため、ファジィ推論によって評価する。

補修すべき橋梁とその補修工法を表す変数は、GAでの個体である。その個体を評価するため、本システムでは、①各工法のLCCに関する値（以下、LCC値と称する）、②ファジィ推論による適応度、③補修費用、を用いる。

(1)LCC値：個体 i における橋梁 j に対するLCC値 L_{ij} を

$$L_{ij} = C_{ij} + C_j^F P^F \quad (7)$$

$$P^F = R_{ij} / R_{\max} \quad (8)$$

から求める。ここに、 C_{ij} ：個体 i における橋梁 j に用いた補修工法の費用、 C_j^F ：橋梁 j の床版が使用限界状態に至った場合の緊急補修費用、 R_{ij} ：個体 i における橋梁 j に用いた補修工法の補修時期から5年後の危険度（ちなみに、5年なる年数は、補修工法間で補修効果に歴然とした差異が現れる年数で、専門家の意見を参考にした）、 $R_{\max}$ ：使用限界時の危険度（ここでは100）、である。

次に、橋梁 j に対するLCC値の最大値 $L_{j\max}$ で L_{ij} を正規化する。すなわち、

$$L_{ij}^R = L_{ij} / L_{j\max} \quad (9)$$

最終的に、個体 i のLCC値 L_i は

$$L_i = \sum_{j=1}^{n_b} L_{ij}^R \quad (10)$$

のように計算される。ここに、 n_b ：橋梁数、である。

(2)目的関数：最適化問題の目的関数と制約条件を次のように設定した。目的関数は式(10)を最小化することで、

$$Y = L_i \rightarrow \min \quad (11)$$

で与えられる。また、制約条件は、

$$\left. \begin{array}{l} F_i/F_{\max} - 0.9 \geq 0 \\ E - C_i \geq 0 \end{array} \right\} \quad (12)$$

で与えられる。ここに、 F_i ：個体 i の適応度、 $F_{\max}$ ：全個体の適応度の中で最大の適応度、 E ：補修のために計上された予算、 C_i ：個体 i の補修費用、である。ただし、次の条件を満足しない解には、 F_i にペナルティを課した。

- 1)床版の損傷状態や原因に叶った補修工法であること。
- 2)道路網を優先した補修工法であること。

5. 探索結果とその考察 Fig.1に示す補修計画地域の道路網に存在する20橋のRC床版の中から補修すべき橋梁とRC床版の損傷に叶った補修工法を予算15億円で探索する。

最適な補修計画をGAで探索すると、Table 1の結果を得る。この場合、

- 1)補修費用は14億1,587万円
- 2)補修から5年経過した後の20橋のRC床版が有する全危険度の合計は401.41

この結果から明らかなように、補修費用は予算15億円内に収まっている。また、補修時から5年後の危険度の合計は、すべての橋梁をまったく補修せず放置した場合の危険度の合計766.8に比べて、ほぼ半減しており、損傷した橋梁群の危険度を効率的に緩和させたことになる。

各々の橋梁に対し、選定された補修工法の良否を検討してみると、6、15、16の橋梁に対して、いずれも交通規制を伴う工法が採用されている。このうち、6の橋梁に採用された『部分打ち換え工法』は、次の理由から、妥当な工法であると思われる。

(a)橋梁6の床版には、崩壊寸前と思われる損傷箇所が部分的にみられる。

(b)橋梁6を含むR6の道路には、R5の迂回路が存在する。R5上の橋梁5では、交通規制を伴わない工法で補修される。

次に、15と16の橋梁に採用された『床版増厚工法と樹脂系接着剤注入工法の組合せ』は、次の理由から、妥当な工法であると考えられる。

(a)橋梁15と16が存在するR13の道路には、R14の迂回路が存在する。R14上の橋梁17と18は交通規制を伴わない工法で補修される。

(b)橋梁15、16は同一路線上に存在する。交通規制を伴う工法とともに採用することは、交通規制上、妥当である。

6. あとがき 本研究では、GAによってRC床版の最適な維持管理計画を立案した。今後、橋梁の全供用期間における最適な補修時期の決定法を検討する必要がある。

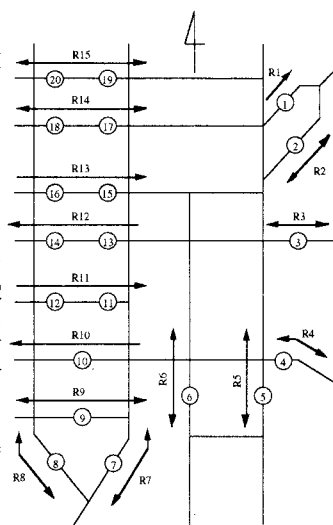


Fig.1 補修計画地域の道路網と橋梁群

Table 1 予算15億円の場合のRC床版の補修計画案

橋梁番号	主な損傷状態	補修時の危険度	補修工法	補修時から5年後の危険度
1	ひび割れ	8.43	樹脂系接着剤注入工法	16.70
2	はく離、鉄筋の露出	42.00	モルタル吹き付け工法	41.01
3	部分的な鉄筋の露出	45.00	鋼板接着工法+モルタル吹き付け工法	12.41
4	豆板、はく離	46.00	モルタル吹き付け工法	43.79
5	ひび割れ	24.28	樹脂系接着剤注入工法	29.57
6	部分的な漏水、錆の流出(ひび割れに黄色い溶出物沈着が観測される)	100.00	部分打ち換え工法	22.04
7	床版の陥没の恐れ	44.00	鋼板接着工法+モルタル吹き付け工法	12.47
8	部分的なひび割れ	5.03	樹脂系接着剤注入工法	10.57
9	はく離、鉄筋の露出	25.27	モルタル吹き付け工法	30.42
10	豆板	24.78	FRP接着工法	12.56
11	ひび割れ	21.65	樹脂系接着剤注入工法	27.31
12	ひび割れ	22.26	樹脂系接着剤注入工法	27.68
13	はく離	43.00	FRP接着工法+モルタル吹き付け工法	12.33
14	はく離	42.00	FRP接着工法+モルタル吹き付け工法	11.58
15	漏水、錆の流出	44.00	床版増厚工法+樹脂系接着剤注入工法	7.58
16	漏水、錆の流出	43.00	床版増厚工法+樹脂系接着剤注入工法	6.94
17	ひび割れ	8.12	樹脂系接着剤注入工法	16.24
18	部分的なひび割れ	6.97	樹脂系接着剤注入工法	14.52
19	はく離	30.21	モルタル吹き付け工法	35.32
20	はく離、空洞	44.00	縦桁増設工法+モルタル吹き付け工法	10.35