

論文 Bridge Management System による複数橋梁の維持管理計画策定

中村秀明*1・鬼丸浩幸*2・河村 圭*3・宮本文穂*4

要旨：橋梁の維持管理業務に要する費用は、近年の著しい損傷を持つ橋梁の増加と共に増大している。そこで、限られた予算内で合理的かつ効率的な維持管理を行うことは、橋梁を長期間にわたって供用する上で必要不可欠である。このような背景のもと、著者らは橋梁に対する維持管理業務の支援を目的とした「Bridge Management System」の開発を行ってきた。本 BMS の機能の一つであるメンテナンスプラン最適化機能は、対象橋梁をある期間維持管理していく上で最適な維持管理計画を策定する機能である。本研究では本機能をさらに充実させるため、複数橋に対して維持管理計画を策定する機能拡張を試みた。

キーワード：BMS, コンクリート橋, 維持管理, 遺伝的アルゴリズム

1. 緒言

我が国では、1950 年代から始まった全国規模での道路交通網の整備により、多くのコンクリート橋が建設された。しかしながら、現在ではそれら橋梁の劣化が進んできており、剥離コンクリートの落下などによる事故も起こっている。コンクリート橋の維持管理業務に要する費用は、近年の著しい損傷をもつコンクリート橋の増加とともに増大している。そこで、限られた予算内で合理的かつ効率的な維持管理を行うことは、橋梁を長期間にわたって供用する上で必要不可欠である¹⁾。このような背景のもと、著者らは橋梁に対する維持管理業務の支援を目的とした「Bridge Management System (BMS)」の開発を行ってきた^{2),3),4)}。BMS の最終的な目標は、道路網を構成する橋梁全体をネットワークとして捉え、限られた予算の中で最大の効果を得るための最適な維持管理計画案の作成を支援することである。しかしながら、現段階では、ネットワークレベルで橋梁を管理できるほどの点検データが十分に整備されておらず、また、ネットワーク上の交通状況、周辺状況や各橋梁の

重要度など考慮すべき情報が十分に揃っていないのが現状である。はじめからネットワークレベルでの橋梁管理を考えると、システムが大規模で非常に複雑になるため、現在までに開発された BMS では、開発の第 1 段階として橋梁の維持管理を 1 橋レベルで考慮している。

本研究では、ネットワークレベルでの橋梁維持管理を考える前段階として、考慮する情報や条件の少ない複数橋梁レベルでの維持管理計画を考え、既存 BMS の機能拡張を試みた。

2. 複数橋レベルでの維持管理計画の最適化

複数橋レベルでの維持管理計画の最適化は、従来の 1 橋レベルの場合と同様に、基本的には橋梁群において経済性(維持管理対策に必要な費用)と品質(耐荷性と耐久性の両方を考慮した指数)を評価指標(目的関数)として、この評価指標を満足するように、経年における維持管理対策を組み合わせることが目的である。本研究では複数橋梁に機能を拡張する際に、新たに考慮すべき要素として解析期間と管理レベルを考える。

*1 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科, 博士(工学) (正会員)

*2 山口大学大学院理工学研究科 博士前期課程知能情報システム工学専攻, 工学士

*3 山口大学 VBL 非常勤研究員, 博士(工学)

*4 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科, 工博 (正会員)

表-1 用語の定義

用語	定義
耐久性	橋梁部材の劣化速度から見た橋梁部材の劣化に対する抵抗性（補修の必要性の指標）
耐荷性	橋梁部材の耐荷力に基づいて評価される橋梁の性能（補強の必要性の指標）
平均健全度	診断によって求められる点検時点での橋梁の劣化程度の余事象
品質	耐荷性および耐久性の平均健全度の総和
コスト	1 m ² を補修・補強するのに必要な費用を表しており、1U（ユニット）≒¥1,000 の単位で表す
解析期間	従来の橋梁ごとに異なる予定供用年数に代わるもので、本研究においては維持管理計画を立てる対象期間
管理レベル	複数の橋梁を考える場合、橋梁が架設されている道路区分(国道と県道、一般道と主要道など)による重要度

表-2 本研究での管理レベル

管理レベル	平均健全度	備考
A	$f, g > 62.5$	主要国道
B	$f, g > 37.5$	一般国道
C	$f, g > 12.5$	主要地方道
D	$f, g > 0$	一般地方道

f : 耐荷性の平均健全度, g : 耐久性の平均健全度

2.1 用語の定義

本研究で用いる用語の定義を表-1 に示す。システム構築のため、これらの用語の中には、一般に使われている定義とは異なり、本研究で独自の意味として定義したものもある。解析期間は、交通関連の研究では、20～30 年を採用する場合が多く、長くても 50 年程度であるが基本的には行政機関の政策的な判断に依存する。また管理レベルは、主要道路や国道などは、一般的に交通量が多いことから劣化の度合いが激しく、また、損壊時の被害を考慮すると甚大なものになることが予想されるため常に高い品質を保っておく必要があるため高く設定している。このことから、管理レベルは予算配分の基準であり、かつ安全性も考慮した指標となっている。本研究では管理レベルのランクを表-2 のように定義した。また、解析期間と管理レベルのイメージ図を図-1 に示す。

2.2 複数橋レベルでの維持管理計画

本研究での複数橋レベルにおける維持管理計画最適化の流れを図-2 に示し、以下にその詳細を述べる。

Step 1 複数の橋梁について劣化診断

コンクリート橋診断エキスパートシステム⁵⁾を用いて、選択した橋梁の諸元や点検データを入力し、各橋梁の現在の劣化程度を診断する。ここで出力される各橋梁の耐荷性・耐久性の平均健全度は Step 2 に引き継がれる。

Step 2 複数の橋梁について劣化予測

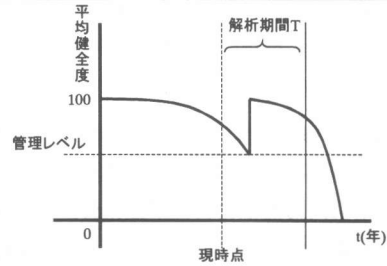


図-1 解析期間と管理レベルのイメージ

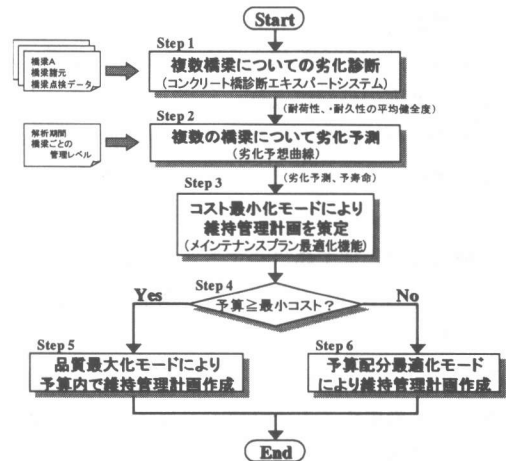


図-2 複数橋における維持管理計画の流れ

解析期間を入力し、劣化予測機能³⁾により各橋梁の劣化程度の予測を劣化予想曲線により行う。出力としては、各橋梁の予想劣化曲線、耐荷性・耐久性に関する余寿命である。

Step 3 コスト最小化モードによる維持管理計画の策定

対象部材、割引率を設定する。各橋梁に設定された管理レベルより上に平均健全度を保つためにかかる総コストの最小化を目的とした最適維持管理計画を策定する（図-3 参照）。出力結果として、各橋梁についての維持管理計画案とコスト、余寿命、予想劣化曲線の推移、品質、全橋梁の総コスト、総品質である。

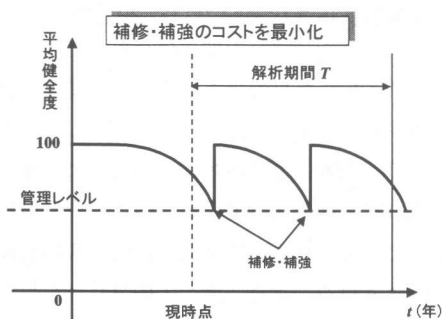


図-3 コスト最小化モードの概念図

Step 4 最小コストと予算の比較

予算を入力し Step 3 で求めた最小コストと比較する。

Step 5 品質最大化モードによる維持管理計画の

策定(予算 $\geq$ 最小コストの場合)

予算をコストに関する制約条件として、予算内で全ての橋梁に対する品質合計の最大化を目的とする維持管理計画の最適化を行う(図-4 参照)。出力は Step 3 と同様である。

Step 6 予算配分最適化モードによる維持管理

計画の策定(予算 $<$ 最小コストの場合)

予算内で維持管理計画を立てるためには、橋梁の平均健全度が管理レベル以下に下がることを許容しなければならない。そこで、安全性を考慮し、各年次で耐荷性あるいは耐久性の平均健全度が管理レベル以下に下がった回数の合計ができるだけ少なくなるような維持管理計画を立てることを目的とする(図-5 参照)。「予算配分最適化モード」では、予算内で管理レベル以下になる回数を減らす(安全性を確保する)ためには、どの工法にどれくらいの予算を配分すれば良いかという問題を解く。平均健全度が管理レベル以下に下がった回数を減らすことは危険な期間を減らす安全性にもつながる。したがって平均健全度が管理レベル以下になった回数の総和を安全性の指標として用いる。ここでの出力は Step 3 での出力と同様である。

2.3 最適化問題へのモデル化

前節で説明した問題を最適化問題として解くための目的関数と制約条件を以下に示す。

【コスト最小化モード】

コスト最小化モードでは、解析期間内において、

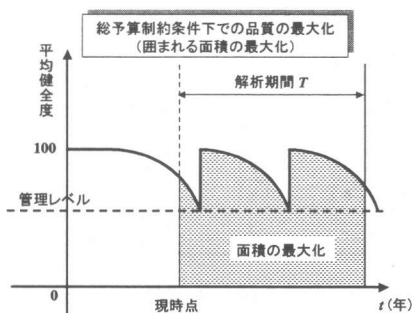


図-4 品質最大化モードの概念図

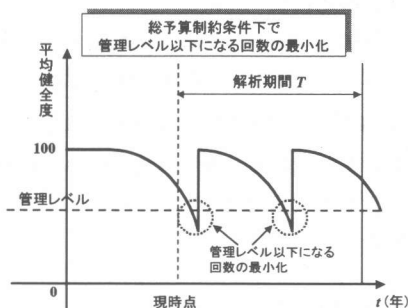


図-5 予算配分最適化モードの概念図

各橋梁に設定された管理レベルを下回らないように行う補修・補強の総コストの最小化を目的としている。したがって、目的関数と制約条件は、以下のように表される(図-3 参照)。

(目的関数)

$$F_1 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{t=1}^{T-1} C_i(t) \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

(制約条件)

$$S_{L_i}(t), S_{D_i}(t) \geq L_i \quad (i=1 \sim n, 0 \leq t \leq T) \quad (2)$$

【品質最大化モード】

本研究では、品質を耐荷性と耐荷性の予想劣化曲線と x 軸で囲まれる面積の和と定義している(厳密には、各年の耐荷性と耐久性の平均健全度の和を用いている)。品質最大化モードでは、総予算を設定し、総予算の範囲内で品質を最大化する(図-4 参照)。

(目的関数)

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{t=1}^{T-1} (S_{L_i}(t) + S_{D_i}(t)) \right) \rightarrow \max \quad (3)$$

(制約条件)

$$S_{L_i}(t), S_{D_i}(t) > L_i \quad (i=1 \sim n, 0 \leq t \leq T) \quad (4)$$

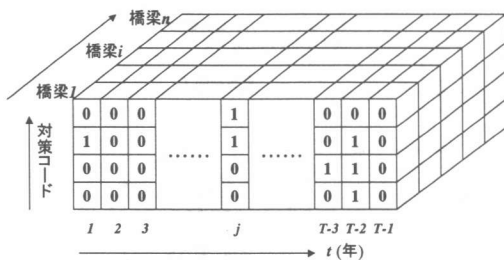


図-6 個体の遺伝子型のイメージ

$$Bud \geq Cost_{F_2} \quad (5)$$

【予算配分最適化モード】

予算配分最適化モードでは、平均健全度が管理レベルを下回ることをある程度許容している。ただし、平均健全度が管理レベル以下になることをできるだけ避けるため、管理レベル以下となる回数を最小化する（図-5 参照）。

（目的関数）

$$F_3 = \sum_{i=1}^n (K_i(t)) \rightarrow \min \quad (6)$$

（制約条件）

$$S_{L_i}(t), S_{D_i}(t) > 0 \quad (i=1 \sim n, 0 \leq t \leq T) \quad (7)$$

$$Bud \geq Cost_{F_3} \quad (8)$$

ここで、

i : 橋梁番号, n : 橋梁数,

t : 現時点からの経過年数, T : 解析期間

Bud : 予算, $Cost_{F_2}$: 品質最大化における総コスト

$Cost_{F_3}$: 予算配分最適化における総コスト

L_i : 橋梁 i の管理レベル

$S_{L_i}(t)$: 橋梁 i の t 年後の耐荷性の平均健全度

$S_{D_i}(t)$: 橋梁 i の t 年後の耐久性の平均健全度

$C_i(t)$: 橋梁 i で t 年後に実施される維持管理対策の費用

$K_i(t)$: 橋梁 i で t 年後に耐荷性あるいは耐久性の平均健全度が管理レベル以下に下がった回数

F_1 : 解析期間内での橋梁維持管理対策の総コスト

F_2 : 解析期間内での橋梁の耐荷性と耐久性の平均健全度の総和

F_3 : 解析期間内での橋梁の耐荷性あるいは耐久性の平均健全度が管理レベル以下に下がった回数（年単位）の総和

3. 遺伝的アルゴリズム (GAs) の適用

GAs とは、生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化した最適化手法である。高等生物では、親から子へ遺伝子によって生物としての情報が伝わり、次世代では各個体の中でもより優れた、つまり環境への適応度の高い個体の遺伝情報が優先的に伝えられる。同時に適応度の低い個体は自然淘汰される。また、遺伝子のコピーを行う際に微妙なエラーを生じることもあり、生物の多様性が広がる。これが遺伝と進化の基本的な原理で GAs は、組み合わせ最適化問題の解法として使われる事が多い。GAs の詳細については文献 6) に譲る。

複数橋レベルの維持管理計画最適化に対して遺伝的アルゴリズム (GAs) を適用する場合は、最適化モードによってその適用方法は異なる。

コスト最小化モードの場合には、式(1)で示されるコストを最小化するため、各橋梁に対して維持管理計画にかかる最小コストを算出し、その総和を複数橋での最小コストとしており、またその値の逆数を個体の適応度としている。制約条件については、式(2)を満たさない個体については、ペナルティーとして適応度である総コストに 5000(U) を足している³⁾。

品質最大化モードと予算配分最適化モードの場合はこれまでの適用方法と異なっており、以下に適用方法を示す。

3.1 遺伝子型へのコーディング

品質最大化モード、予算配分最適化モードでは、個体の遺伝子型を 3 次元配列として扱っている。

図-6 に個体の遺伝子型を示す。この遺伝子型は解析期間まで各年ごとの対策が橋梁数分存在する。

3.2 適応度の計算

個体は各橋梁の維持管理計画の集合体を表現している。品質最大化モードの場合、各橋梁の品質を求め、その合計を個体の適応度として用いている。また、予算配分最適化モードの場合には、各橋梁ごとに平均健全度が管理レベルを下回った回数を求め、それらの合計値の逆数を適応度として用いている。

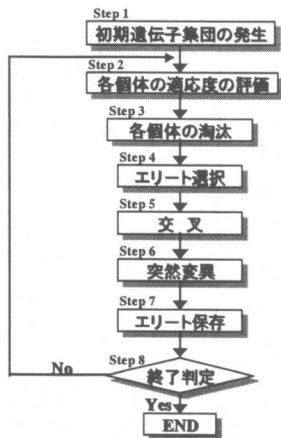


図-7 本研究で用いた GA のフロー

3.3 GAs の処理手順（複数橋）

複数橋レベルの維持管理計画最適化に GAs を適用する際の処理手順を以下に示す。（図-7 参照）

【Step 1】初期遺伝子集団の発生

品質最大化モードの場合、コスト最小化モードにより算出された最終エリート個体をそのまま初期集団の一つとして加え、残りの29個体を乱数を用いてランダムに発生させる。

予算配分最適化モードの場合には、ランダムに30個の個体を発生させる。

【Step 2】各個体の適応度の評価

個体の適応度を3.2節で定めた方法で計算する。

【Step 3】各個体の淘汰

1 橋レベルの場合と同様に選択手法はトーナメント方式を用いた。30 個の個体からランダムに2つ選び出して、その個体の適応度が高い方を採用する。ただし、予算配分最適化の場合は、平均健全度が管理レベル以下となる回数のとりうる範囲が狭いため、同じ適応度になる個体が多数発生する。そこで、この場合には、さらに品質について比較し、より品質の高いものを選択する。

【Step 4】エリート選択

Step 2 で求めた最も高い適応度をもつ個体をエリート個体として保存する。

【Step 5】交叉

交叉手法は、1 橋レベルの場合と同様に1点交叉を用いた。個体が3次元的に表現されていることから、まず年次に対して交叉位置をランダムに

表-3 橋梁劣化診断結果（主桁）

橋梁名	Ou 橋	To 橋	Ha 橋	Ni 橋	No 橋
橋齢（年）	29	42	43	58	41
耐荷性健全度	80.0	66.3	66.3	36.3	71.3
耐久性健全度	78.8	62.5	51.3	28.8	73.8
路線	一般国道	一般国道	主要県道	主要県道	一般県道
管理レベル	B	B	C	C	D

表-4 実行結果

最適化モード	コスト最小化	品質最大化	予算配分最適化
コスト制約(U)	—	500.0	300.0
総コスト (U)	389.5	499.8	296.3
・総品質	14526	16208	12743
安全性指標			19

決め、次に橋梁に対して交叉位置をランダムに決めて交叉を行っている。この操作を個体番号1〜29まで繰り返し、30番目の個体にはエリート個体が後ほど加えられる。

【Step 6】突然変異

突然変異は個体単位で行う。個体が突然変異を起こす確率は30%であると仮定し、個体の複数橋梁すべてに対して起こる。橋梁ごとにどの年に突然変異が起こるかをランダムに決め、次に対策を表す4ビットコードのどの位置で起こすかをランダムに決める。

【Step 7】エリート保存

保存しておいたエリート個体を30番目の個体とする。

【Step 8】終了判定

Step 2からStep 8までを世代交代数が300世代に達するまで行う。

4. 実橋梁への適用

拡張された本機能を山口県内に架設されている5つの橋梁に対して適用した。まず始めに対象となる5つの橋梁に対して専門家による点検を行い、橋梁諸元や点検データをコンクリート橋診断エキスパートシステムに入力し劣化診断を行った。エキスパートシステムによる劣化診断結果を表-3に示す。次に、この劣化診断結果を基に、解析期間を20年、対象部材を主桁、割引率を5%と設定して複数橋梁における維持管理計画の最適化を行った。最適化の実行結果を表-4に示し、それぞれのモードにおいて選ばれた維持管理対策の組み合わせを表-5に示す。

表-5 選択された維持管理対策

橋梁名 (橋齢)	コスト最小化	品質最大化 (予算制約: 500U)	予算配分最適化 (予算制約: 300U)
Ou 橋 (29 年)	9 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 樹脂注入 (コスト: 74.8, 品質: 3189)	9 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 樹脂注入 (コスト: 74.8, 品質: 3189)	3 モルタル吹き付け, 樹脂注入 (コスト: 41.9, 品質: 2638)
To 橋 (42 年)	1 樹脂注入 6 モルタル吹き付け, 樹脂注入 11 樹脂注入 (コスト: 78.9, 品質: 2806)	1 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 樹脂注入 11 樹脂注入 (コスト: 121.0, 品質: 3704)	2 モルタル吹き付け, 樹脂注入 (コスト: 46.1, 品質: 2354)
Ha 橋 (43 年)	1 モルタル吹き付け, 樹脂注入 7 樹脂注入 (コスト: 65.5, 品質: 2614)	1 モルタル吹き付け, 樹脂注入 7 樹脂注入 (コスト: 65.5, 品質: 2614)	1 ガラスクロス, 樹脂注入 (コスト: 58.9, 品質: 2379)
Ni 橋 (58 年)	1 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 断面修復, 樹脂注入 6 樹脂注入 (コスト: 135.1, 品質: 3435)	1 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 断面修復, 樹脂注入 6 樹脂注入 (コスト: 135.1, 品質: 3435)	2 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 断面修復, 樹脂注入 (コスト: 111.4, 品質: 2983)
No 橋 (41 年)	1 樹脂注入 (コスト: 35.2, 品質: 2480)	1 FRP2 枚接着 or 鋼板接着, 樹脂注入 11 樹脂注入 (コスト: 121.0, 品質: 3264)	8 モルタル吹き付け, 樹脂注入 (コスト: 38.0, 品質: 2386)

※維持管理対策の前に書かれている数字は、対策年を表す。例えば9の場合2009年に対策を行うことを意味する。

表-4の実行結果を見ると、制約条件内での計画が立案されている。表-5の選択された維持管理対策案では、品質最大化モードの場合は予算に余裕があるため、補強工法であるFRP2枚接着 or 鋼板接着が選ばれている。FRP2枚接着 or 鋼板接着は、工費が比較的高価であるが、耐久性と耐荷性の両方に効果があるため、品質最大化への寄与が大きいため選ばれることが多いと考えられる。

予算配分最適化モードは、予算の制約が厳しいため、工費が高価である補強が選ばれることは少ない。Ou橋、No橋は耐荷性および耐久性の平均健全度が他の橋梁に比べ高いため、費用が安価な「モルタル吹き付け、樹脂注入」が選ばれている。Ni橋では、FRP2枚接着 or 鋼板接着の補強が選ばれているが、これはNi橋が他の橋梁に比べ、特に損傷がひどかったためと考えられる。

5. 結論

本研究では、ネットワークレベルでの橋梁維持管理を考える前段階として、考慮する情報や条件の少ない複数橋梁レベルでの維持管理計画を考え、既存BMSの機能拡張を試みた。5つの橋梁に対して本機能を適用した結果、いずれの最適化モードにおいても制約条件内での計画が立案されており、遺伝的アルゴリズムでの最適化がきちんと行われていることが確認された。品質最大化モードでは最小コストからの上乗せ予算によってすべての橋梁ではなく一部の橋梁に品質向上のための補強が選ばれており、複数橋全体としての品質向上が図

られている。ただ、橋梁によっては、コスト最小化と同じ対策が選ばれており、一つの橋梁で考えると品質は変わっていない。予算配分最適化モードは、予算制約内での維持管理計画が立案されており、遺伝的アルゴリズムでの最適化は問題ないと思われる。しかしながら、最適化のための目的関数として、平均健全度が管理レベルを下回った回数の総和を用いているため、管理レベルを長期間にわたって下回っていたり、平均健全度がかなり低くなっている場合も考えられる。したがって、今後は、目的関数の妥当性についてさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.10.
- 2) 宮本文穂，串田守可，足立幸郎，松本正人：Bridge Management System(BMS)の開発，土木学会論文集，No.560/VI-34，pp.91-106，1997.3.
- 3) 宮本文穂，河村 圭，中村秀明：Bridge Management System (BMS)を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.191-208，1998.3.
- 4) 河村 圭，宮本文穂，中村秀明，小野正樹：Bridge Management System(BMS)における維持管理対策選定システムの開発，土木学会論文集，No.658/VI-48，pp.121-139，2000.9.
- 5) 宮本文穂，河村 圭，中村秀明，山本秀夫：階層構造ニューラルネットワークを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発，土木学会論文集，No.644/VI-46，pp.67-86，2000.3.
- 6) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993.6.