

二段階分枝限定法による既存橋梁の最適補修パーツの選定法

An efficient optimal selection method for repairing components of damaged bridges
using two stage branch-and-bound method

谷脇 一弘*, 大賀水田生**

Kazuhiro TANIWAKI and Mitao OHGA

*正会員 博士 (工学) 愛媛大学講師 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

**正会員 工学博士 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

This paper presents an efficient optimal selection method for repairing components of damaged bridges using branch-and-bound method. Based on an orthogonal array of a combination of factor, questionnaires of damage ratings of bridge components and whole bridges are made for bridge engineers, and then, the design of experiments and holographic neural network are employed to evaluate the damage ratings of bridge components and whole bridges. In cooperating with the damage evaluating system, two stage branch-and-bound method is successfully developed to select the optimal repairing components of damaged bridges in primal repair plan. The effectiveness and reliability of the proposed method are demonstrated by giving a numerical example of large scale repairing components selection problem.

Key Words : two stage branch-and-bound method, design of experiments, holographic neural network, evaluation of damage rating of bridge, repair plan

1. まえがき

近年ますます増加する耐用年数間近の老朽化した橋梁も適切な維持管理対策による延命を行い、新設する橋梁の建設量を最小限にとどめながら安全にかつ経済的に橋梁の維持管理を行うことが重要な課題となってきた。このためには、統一的に評価できる橋梁管理システムの開発が必要不可欠となっており、近年、橋梁の維持管理システムに関する研究が活発に行われてきている。これまでの研究において、大島ら¹⁾は多くの橋梁の点検結果について熟練技術者にアンケートを実施し、数量化理論Ⅱ類を適用してアンケート結果を分析し、橋梁健全度評価に与える影響要因を検討している。安田ら²⁾は、点検技術者の思考過程をニューラルネットワークに委ね鉄筋コンクリート構造物の健全度の評価システムを提案している。近田ら^{3,4)}は、数量化理論Ⅱ類を用いて導入した健全度評価式を目的関数とし、最適な補修パーツを選定する方法を提案している。中村ら⁵⁾は、一つの橋梁の主桁と床版に着目し、ライフサイクルコスト(LCC)を考慮して最適な維持管理対策および対策時期を決定する方法を提案している。古田ら⁶⁾は、道路橋RC床版を対象とし、橋梁を管理するLCC、道路の利用者のLCCおよび補修工法の損傷橋梁と周辺環境への適応度を目的関数として考慮し、維持管理計画の最適解を決定する方法を提案している。上記の研究における最適解の決定方法として遺伝的アルゴリズムに基づく方法が有効に用いられているが、最適化過程においては遺伝的アルゴリズム特有のパラメー

タのチューニングに経験が必要であることも指摘されている。

一方、Frangolら⁷⁾は、LCCを考慮した最適補修問題を信頼性理論に基づき展開し、供用期間中の橋梁の信頼性指標が目標値以上となる制約条件のもとで維持管理費用を最小化するような最適補修戦略の決定法を提案している。この方法では、信頼性指標を用いて橋梁の健全度をより理論的に表現できる利点を有しているが、一つの橋梁について数多くの破壊モードを仮定して信頼性指標を計算する必要があり、今後より実用的なアプローチの開発が望まれる。

ところで、地方公共団体によっては必ずしも管理している橋梁の十分な点検データが蓄積されているとはいえず、また予算削減から専門ではない職員が橋梁の点検を行い健全度の評価および維持管理計画を行わなければならない状況が生じてきている。そこで本研究では、専門技術者でなくとも橋梁のパーツの損傷度および橋梁の危険度を容易にかつ統一的に評価することができる汎用的な評価システムを構築し、大規模な損傷橋梁群の中から補修すべきパーツを容易に選定できる最適補修パーツの選定法を確立することを目的として研究を行ったものである。

従来の研究では、既に行われている点検結果に対して健全度評価アンケートを点検維持管理専門技術者に実施し評価式を導入しているが、本研究では、直交表に従い予め設定した橋梁のパーツの損傷度および橋梁の危険度(健全度)の二種類のアンケートを実施し、実験計画法およびホログ

ラフィックニューラルネットワークの手法を用いて評価を行っている。大規模な最適補修パーツ選定問題では、近田らの考え方と同じく補修計画の最も基本となる限られた予算のもとで LCC を考慮しない場合の最適な補修パーツを選定する問題を対象とし、上で述べた橋梁評価システムおよび本研究で開発した二段階の分枝限定法を用いて解くことにより、最適化過程において特別なパラメータを設定することなくきわめて容易にかつ正確に最適な補修パーツの選択を行えることを示している。

2. 実験計画法およびホログラフィックニューラルネットワークによる評価法

本研究で橋梁のパーツの損傷度および橋梁の危険度の評価システムを構築するために用いた実験計画法およびホログラフィックニューラルネットワークの概要を以下に述べる。

2.1 実験計画法⁸⁾

直交表を利用した実験計画法は、各要因の設定した水準の範囲において、要因および水準の個数により対応した直交表に従い特性値に対する要因の影響度を効率よく実験を行い、特性値の推定式を Chebyshev の直交多項式を用いて表現する方法である。各要因に相関がある場合には、相関を考慮して水準値を設定する必要がある。等間隔の水準を持つ要因 A と要因 B の 2 つの要因を考慮した場合について、各要因の 2 次の項までを考慮するものとする、特性値を示す推定式は次に示す直交多項式により表現することができる。

$$\begin{aligned} f = & b_{00} + b_{10}(A - \bar{A}) + b_{01}(B - \bar{B}) \\ & + b_{20}\left[(A - \bar{A})^2 - \frac{a^2 - 1}{12}h_A^2\right] \\ & + b_{11}(A - \bar{A})(B - \bar{B}) \\ & + b_{02}\left[(B - \bar{B})^2 - \frac{b^2 - 1}{12}h_B^2\right] \\ & + b_{21}\left[(A - \bar{A})^2 - \frac{a^2 - 1}{12}h_A^2\right](B - \bar{B}) \\ & + b_{12}(A - \bar{A})\left[(B - \bar{B})^2 - \frac{b^2 - 1}{12}h_B^2\right] \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、

$\bar{A}, \bar{B}$: 要因 A, 要因 B の水準値の平均

h_A, h_B : 要因 A, 要因 B の水準間隔

a, b : 要因 A, 要因 B の水準数

b_{00} : 全実験データの平均値

式(1)の要因 A に関する単独項の係数 b_{10}, b_{20} は次式により求められる。

$$b_{10} = \frac{\sum_{m=1}^a W_m A_m}{\gamma(\lambda S)_A h_A^i} \quad (2)$$

同様に要因 B に関する単独項の係数 b_{01}, b_{02} は次式により求められる。

$$b_{0j} = \frac{\sum_{n=1}^b W_n B_n}{\gamma(\lambda S)_B h_B^j} \quad (3)$$

交互作用を示す項の係数 b_{ij} は次式により与えられる。

$$b_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^a W_m \left[\sum_{n=1}^b W_n (A_m B_n) \right]}{\gamma(\lambda S)_A h_A^i (\lambda S)_B h_B^j} \quad (4)$$

式(2)~(4)において、 A_m および B_n はそれぞれ要因 A の水準が m 番目および要因 B の水準が n 番目の実験データの合計を示す。 γ は各水準のデータ数、 $W_m, W_n, \lambda S$ の数値は文献8)に係数表としてまとめられているので参照されたい。

2.2 ホログラフィックニューラルネットワーク⁹⁾

本研究では、萩原ら⁹⁾により実用化され有効性が示されているホログラフィックニューラルネットワーク（以後ニューラルネットワークと称す）を用いて評価を行っている。この方法では、入出力の実数データを複素平面に写像し、入出力を伝達マトリックスを用いて線形結合で表現し、教師データとの誤差を最小するような伝達マトリックスを決定する方法である。入出力の実数教師データはシグモイド関数を用いて次式により複素平面に写像することができる。

$$\text{入力教師データ } S_k^i \text{ の写像 : } f(S_k^i) = \lambda_k^i e^{i\theta_k^i} \quad (5)$$

$$\text{出力教師データ } T_k^j \text{ の写像 : } g(T_k^j) = \gamma_k^j e^{i\phi_k^j} \quad (6)$$

ここに、 λ_k^i および γ_k^j は入力および出力教師データ値に対応する位相角度域に出現する確率を示し本研究ではすべて 1.0 とした。

式(5)および(6)の入出力値に対する位相角度 θ_k^i, ϕ_k^j はシグモイド関数を用いて次式により得られる。

$$\theta_k^i = \frac{2\pi}{(1 + e^{-c_i(S_k^i - \mu_S)/\sigma_S})} \quad (7)$$

$$\phi_k^j = \frac{2\pi}{(1 + e^{-c_j(T_k^j - \mu_T)/\sigma_T})} \quad (8)$$

ここに、 μ_S および μ_T は入力教師データおよび出力教師データの平均値、 σ_S および σ_T は入力教師データおよび出力教師データの標準偏差、 c_k はシグモイド関数の傾きを調整するパラメータで本研究では 1.0 とした。

サンプル数を P 、1 つのサンプルにおける入力数を n 、1

つのサンプルにおける出力数を m とすると、入力教師データ $\mathbf{T}_s$ は以下のように表現することができる。

$$\mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} \lambda_1^1 e^{i\theta_1^1} & \dots & \lambda_1^j e^{i\theta_1^j} & \dots & \lambda_1^n e^{i\theta_1^n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_k^1 e^{i\theta_k^1} & \dots & \lambda_k^j e^{i\theta_k^j} & \dots & \lambda_k^n e^{i\theta_k^n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_p^1 e^{i\theta_p^1} & \dots & \lambda_p^j e^{i\theta_p^j} & \dots & \lambda_p^n e^{i\theta_p^n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

同様に出力教師データ $\mathbf{T}_r$ も以下のように表現することができる。

$$\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} \gamma_1^1 e^{i\theta_1^1} & \dots & \gamma_1^j e^{i\theta_1^j} & \dots & \gamma_1^m e^{i\theta_1^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_k^1 e^{i\theta_k^1} & \dots & \gamma_k^j e^{i\theta_k^j} & \dots & \gamma_k^m e^{i\theta_k^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_p^1 e^{i\theta_p^1} & \dots & \gamma_p^j e^{i\theta_p^j} & \dots & \gamma_p^m e^{i\theta_p^m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ネットワークの入力教師データ値 $\mathbf{T}_s$ と応答値 $\mathbf{R}$ の関係は式(11)で与えられ、伝達マトリックス $\mathbf{X}$ の各要素は応答 $\mathbf{R}$ と出力教師データ $\mathbf{T}_r$ との2乗誤差 $\mathbf{Er}$ を最小にするよう最急勾配法により決定される。

$$\mathbf{R} = \mathbf{T}_s \cdot \mathbf{X} \quad (11)$$

$$\mathbf{Er} = (\mathbf{R} - \mathbf{T}_r)^T \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{T}_r) \quad (12)$$

バックプロパゲーションによるニューラルネットワークではノードの数や中間層の数により予測の精度が左右されるため、ネットワークを構築する際にはこれらに注意を払わなければならないことに対し、ホログラフィックニューラルネットワークでは、複素数のデータを取り扱うことにより2次項や共役項を作成して擬似的に内部入力数 n を増やし複素空間により密に分布させることにより精度を自動的に向上させることができる特長を有している。本研究では初期の入力データに対して最急勾配法による収束計算回数が5000回を越えた時点で初期の各項の2次項および各項を掛け合わせた項を追加し、さらに収束計算回数が10000回を越えた場合には共役な複素数の項をも追加して伝達マトリックスのサイズを変更して最急勾配法の収束計算を行っている。擬似的内部入力操作について初期の入力データが3個の場合の例を以下に示す。

① 初期の入力教師データ ($n=3$)

$$\lambda_1 e^{i\theta_1}, \lambda_2 e^{i\theta_2}, \lambda_3 e^{i\theta_3}$$

② 初期の各項の2次項および各項を掛け合わせた項を追加 ($n=9$)

$$\lambda_1 e^{i\theta_1}, \lambda_2 e^{i\theta_2}, \lambda_3 e^{i\theta_3}, (\lambda_1 e^{i\theta_1})^2, (\lambda_2 e^{i\theta_2})^2, (\lambda_3 e^{i\theta_3})^2, \lambda_1 \lambda_2 e^{i(\theta_1+\theta_2)}, \lambda_1 \lambda_3 e^{i(\theta_1+\theta_3)}, \lambda_2 \lambda_3 e^{i(\theta_2+\theta_3)}$$

③ ②の共役複素数の項の追加 ($n=18$)

表-1 各パーツの損傷項目

パーツ	鋼 橋	コンクリート橋
主桁	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・ゆるみ脱落 ・遊間の異常 ・異常な音・振動 ・変形・欠損	・ひびわれ (コンクリート) ・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・うき ・遊間の異常 ・定着部の異常 ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・異常な音・振動 ・変形・欠損
床版	・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・抜け落ち・床版ひび割れ ・うき ・遊間の異常 ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・変形・欠損	・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・抜け落ち・床版ひび割れ ・うき ・遊間の異常 ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・変形・欠損
二次部材	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・ゆるみ脱落 ・異常な音・振動 ・変形・欠損	
橋脚 橋台 基礎	・ひびわれ (コンクリート) ・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・うき ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・変形・欠損 ・沈下・移動・傾斜 ・洗掘	・ひびわれ (コンクリート) ・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・うき ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・変形・欠損 ・沈下・移動・傾斜 ・洗掘
支承	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・ゆるみ脱落 ・支承の機能障害 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・変形・欠損 ・土砂つまり ・沈下・移動・傾斜	・亀裂・破断 ・支承の機能障害 ・変形・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・変形・欠損 ・土砂つまり
落橋防止システム	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・ゆるみ脱落 ・遊間の異常 ・定着部の異常 ・異常な音・振動 ・変形・欠損	・ひびわれ (コンクリート) ・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・うき ・遊間の異常 ・定着部の異常 ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・異常な音・振動 ・変形・欠損
高欄	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・ゆるみ脱落 ・変形・欠損	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・ゆるみ脱落 ・変形・欠損
地覆	・ひびわれ (コンクリート) ・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・うき ・変色・劣化	・ひびわれ (コンクリート) ・剥離・鉄筋露出 ・遊離石灰・遊離石灰による漏水 ・うき ・変色・劣化
伸縮装置	・腐食・防食機能の劣化 ・亀裂・破断 ・遊間の異常 ・路面の凹凸 ・土砂のつまり	・遊間の異常 ・路面の凹凸 ・変色・劣化 ・排水施設の損傷による漏水・滞水 ・異常な音・振動 ・変形・欠損 ・土砂つまり
舗装	・路面の凹凸 ・舗装の異常	・路面の凹凸 ・舗装の異常

$$\lambda_1 e^{i\theta_1}, \lambda_2 e^{i\theta_2}, \lambda_3 e^{i\theta_3}, (\lambda_1 e^{i\theta_1})^2, (\lambda_2 e^{i\theta_2})^2, (\lambda_3 e^{i\theta_3})^2, \\ \lambda_1 \lambda_2 e^{i(\theta_1+\theta_2)}, \lambda_1 \lambda_3 e^{i(\theta_1+\theta_3)}, \lambda_2 \lambda_3 e^{i(\theta_2+\theta_3)}, \lambda_1 e^{-i\theta_1}, \lambda_2 e^{-i\theta_2}, \\ \lambda_3 e^{-i\theta_3}, (\lambda_1 e^{-i\theta_1})^2, (\lambda_2 e^{-i\theta_2})^2, (\lambda_3 e^{-i\theta_3})^2, \lambda_1 \lambda_2 e^{-i(\theta_1+\theta_2)}, \\ \lambda_1 \lambda_3 e^{-i(\theta_1+\theta_3)}, \lambda_2 \lambda_3 e^{-i(\theta_2+\theta_3)}$$

3. 橋梁を構成するパーツの損傷度評価

橋梁を構成する各パーツの損傷度評価は、点検維持管理専門技術者の現地損傷調査結果に基づき技術者の経験により行われている。しかし本研究では、専門ではない職員が損傷度の評価を行うことができるシステムを作成することを目的としているため、予め設定したパーツの損傷ケースについて点検維持管理専門技術者にアンケート調査を実施し、実験計画法及びニューラルネットワークの手法を用いていかなる損傷状態に対してもパーツの損傷度を評価することができる汎用的なシステムを構築することとした。

鋼橋を構成するパーツとして主桁、床版、二次部材、橋脚・橋台・基礎、支承、落橋防止システム、高覧、地覆、伸縮装置、舗装の10パーツを、コンクリート橋では二次部材を除いた9パーツを考慮した。アンケートに用いた各パーツの損傷項目は文献10)を参照し表-1のように設定した。アンケートでは、ケース数が少ないほど回答者のあいまいな判断による誤差を回避できると考えられるため、本研究では表-2に示す直交表 $L_{27}3^{13}$ の27ケースを1つのパーツの損傷のケース数と設定した。各損傷項目は互いに相関がある場合もあり、相関を考慮して水準値を決定する必要があるが、水準値の設定に関しては実際の橋梁を調査して定める必要があり、本研究では5段階評価の1,3,5を水準

値とした。すなわち、健全な場合を損傷度1、損傷が多くありパーツを補修・補強する必要がある場合を損傷度5の5段階で設定し、直交表の水準値1を損傷度1、水準値2を損傷度3、水準値3を損傷度5と置き換え、各損傷要因を表-2の①から順に当てはめアンケートを作成し、6名の点検維持管理専門技術者に対してアンケートを実施した。なお、推定式において、交互作用の項は考慮していない。

鋼橋の主桁の損傷度評価アンケートおよび6名の回答者の結果を表-3に示す。このアンケートの場合には、各損傷項目を表-2の要因①～⑬に順にあてはめ各ケースを作成し

表-2 $L_{27}3^{13}$ の直交表

		要因												
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
アンケートパターン	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
	5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
	6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
	7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
	8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
	9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
	10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
	12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
	13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
	14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
	15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
	16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
	17	2	3	1	2	2	3	1	2	3	3	1	2	3
	18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
	19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
	20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
	21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
	22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
	23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
	24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
	25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
	26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
	27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

表-3 鋼橋の主桁の損傷度評価アンケート

(各項目の損傷基準 1:健全 2:軽微 3:小 4:中 5:大)

ケース番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22	No.23	No.24	No.25	No.26	No.27
腐食・防食機能の劣化	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5
亀裂・破断	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	1	1	3	3	3	5	5	5
ゆるみ脱落	1	1	1	3	3	3	5	5	5	3	3	3	5	5	5	1	1	1	5	5	5	1	1	1	3	3	3
遊間の異常	1	1	1	3	3	3	5	5	5	5	5	5	1	1	1	3	3	3	3	5	5	5	5	1	1	1	
異常な音・振動	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
変形・欠損	1	3	5	1	3	5	1	3	5	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1
A氏の損傷度評価	1.0	3.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
B氏の損傷度評価	1.0	3.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	5.0	3.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0	5.0	5.0
C氏の損傷度評価	1.0	3.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0
D氏の損傷度評価	1.0	2.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	5.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0	5.0	4.0	5.0
E氏の損傷度評価	1.0	2.0	4.0	2.0	3.0	4.0	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0
F氏の損傷度評価	1.0	3.0	4.0	3.0	3.0	4.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0
平均	1.0	2.7	4.0	2.8	3.3	4.0	4.2	4.3	4.8	3.5	3.5	3.5	3.7	4.2	4.2	4.2	4.5	4.3	4.8	4.2	4.5	4.2	3.7	4.2	4.8	4.5	4.8

損傷度評価結果の基準

- 1: 損傷なし 2: 補修・補強する必要なし 3: 損傷は容認範囲であり現在補修・補強の必要なし
4: 状況に応じて補修・補強する必要あり 5: 補修・補強が必要

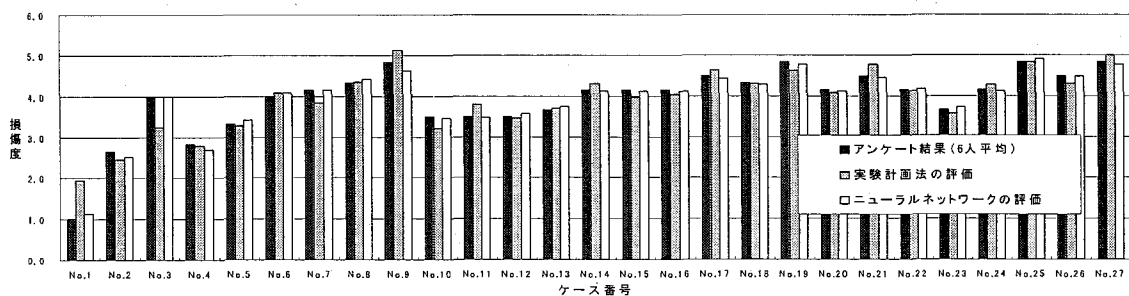


図-1 鋼橋の主桁損傷度のアンケート結果、実験計画法およびニューラルネットワークによる評価比較

ている。実験計画法の評価式では、各要因の2次項までを考慮し交互作用の項は考慮していない。6名のアンケート結果の平均値と実験計画法およびニューラルネットワークの各方法により得られた評価結果の比較を図-1に示す。ニューラルネットワークでは全体的にアンケート結果との誤差が小さく精度よく推定されているのに対し、実験計画法では損傷度の大きいケースは比較的精度よく評価されているが、損傷度の小さいケースでは精度が劣る傾向となっている。実験計画法では最大13個の要因を考慮できる直交表に対して6要因のみ考慮し、その他の要因は誤差項となっているため推定式の精度が劣ったものと考えられる。鋼橋およびコンクリート橋のすべてのパーツに対して損傷度の評価を行った結果、上記と同様の結果が得られ、ニューラルネットワークの手法が各パーツの損傷度評価により適

した汎用的な手法といえる。

4. 橋梁の危険度評価

一般に橋梁全体の評価の指標として健全度が用いられるが、本研究では最適パーツの選定問題を分枝限定法を用いて解く場合に最小化問題として定式化する方法が取り扱いが単純となることを考慮して危険度を用いることとした。各パーツの損傷はパーツ間において相関がある場合もみられるが、一部のパーツの補修・補強を行った後は独立して損傷が発生するものと仮定でき、いかなるパーツの損傷状態においても評価が可能となるように表-2の直交表に従い5段階評価の1,3,5を水準値とした27ケースの損傷ケースを予め設定し橋梁の危険度評価アンケートを実施した。アン

表-4 鋼橋の危険度評価アンケート

(1: 損傷なし 2: 補修する必要なし 3: 損傷は容認範囲であり、現在補修する必要なし 4: 状況に応じて補修する必要あり 5: 補修が必要)

ケース番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	No.22	No.23	No.24	No.25	No.26
主桁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5
床版	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	1	1	3	3	3	5	5
二次部材	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3
橋脚・橋台・基礎	1	3	5	1	3	5	1	3	5	3	5	1	3	5	1	3	5	1	5	1	3	5	1	3	5	1
支承本体	1	3	5	1	3	5	1	3	5	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1
落橋防止システム	1	3	5	3	5	1	5	1	3	5	1	3	5	1	3	1	3	5	5	1	3	1	3	5	3	5
高欄	1	3	5	3	5	1	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3
地覆	1	3	5	5	1	3	3	5	1	3	5	5	1	3	3	5	1	3	5	1	3	5	5	1	3	5
伸縮装置	1	3	5	5	1	3	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
舗装	1	3	5	5	1	3	3	5	1	5	1	3	3	5	1	1	3	5	3	5	1	1	3	5	5	1
A氏の危険度評価	1.0	2.4	4.5	2.5	3.5	4.5	4.3	4.3	4.8	3.8	3.9	3.1	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.2	4.3	4.2	4.0	4.2	4.3	4.1	4.9	4.7
B氏の危険度評価	1.0	2.3	4.5	3.0	4.0	4.3	4.0	4.2	4.8	4.0	4.1	4.0	4.0	4.6	4.0	4.5	4.9	4.2	4.9	4.4	4.9	4.8	4.5	4.9	4.9	4.9
C氏の危険度評価	1.0	2.8	3.1	3.0	4.3	4.8	3.9	4.5	4.9	4.1	4.4	3.8	4.3	4.9	3.9	4.6	4.9	4.4	4.9	3.8	4.6	4.9	4.0	4.9	4.9	4.7
D氏の危険度評価	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.9	4.9
E氏の危険度評価	1.0	2.0	4.0	3.0	3.0	4.9	3.0	4.0	4.9	4.0	4.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.9	4.0	4.0	4.9	4.0
F氏の危険度評価	1.0	3.0	4.0	2.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.9	3.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
平均	1.0	2.4	3.9	2.8	3.5	4.3	3.7	4.2	4.7	3.7	3.9	3.3	3.8	4.1	3.7	4.2	4.4	4.1	4.7	4.2	4.4	4.6	4.3	4.5	4.9	4.7

危険度評価結果の基準

- 1: 健全である 2: 安全上問題なし 3: 安全上問題はないが、定期点検で損傷の進展を調査する必要がある
4: やや危険である 5: 危険である

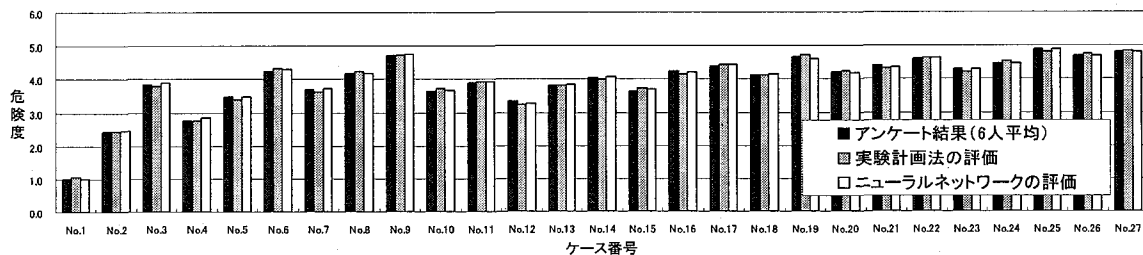


図-2 鋼橋の危険度評価アンケートの結果、実験計画法およびニューラルネットワークによる評価比較

表-5 危険度評価アンケート結果による各パーツの重み

パーツ	鋼 橋							コンクリート橋						
	A氏	B氏	C氏	D氏	E氏	F氏	平均	A氏	B氏	C氏	D氏	E氏	F氏	平均
主桁	0.16	0.23	0.25	0.34	0.23	0.29	0.25	0.22	0.27	0.28	0.24	0.33	0.38	0.28
床版	0.20	0.15	0.25	0.23	0.16	0.18	0.19	0.20	0.18	0.28	0.24	0.12	0.26	0.21
二次部材	0.10	0.11	0.10	0.05	0.07	0.14	0.10							
橋脚・橋台・基礎	0.15	0.17	0.25	0.08	0.26	0.14	0.17	0.19	0.20	0.29	0.15	0.26	0.23	0.22
支承	0.13	0.08	0.05	0.11	0.14	0.08	0.10	0.09	0.10	0.05	0.15	0.12	0.13	0.11
落橋防止システム	0.07	0.06	0.05	0.00	0.00	0.08	0.05	0.07	0.05	0.05	0.07	-0.02	-0.03	0.03
高欄	0.06	0.07	0.02	0.03	0.00	0.02	0.03	0.08	0.06	0.02	0.00	0.05	0.03	0.04
地覆	0.02	0.05	0.01	0.05	0.00	0.02	0.03	0.03	0.04	0.01	0.07	0.05	0.00	0.04
伸縮装置	0.06	0.03	0.01	0.08	0.07	0.02	0.05	0.10	0.06	0.02	0.07	0.05	-0.02	0.05
舗装	0.04	0.04	0.01	0.03	0.07	0.02	0.03	0.03	0.04	0.01	0.00	0.05	0.03	0.03

ケートにおいては、初期のアンケート結果に対して分散分析を行い各パーツが危険度に与える影響（重み）を検討した結果、6名の技術者に別途実施した重みのヒアリング結果と大きく異なる場合も生じたため、回答者に分散分析の結果を示し回答者によるアンケート結果の微調整を行っている。

鋼橋の危険度評価アンケートおよび回答者の結果を表4に示す。このアンケートでは、主桁を表2の要因①、床版を要因②、二次部材を要因⑤、橋脚・橋台・基礎を要因⑥、支承を要因⑦、落橋防止システムを要因⑨、高欄を要因⑩、地覆を要因⑪、伸縮装置を要因⑫、舗装各損傷項目を要因⑬にそれぞれあてはめ各ケースを作成している。実験計画法では各パーツの損傷度の2次の項までおよび主桁と床版の交互作用の項も考慮することとし、鋼橋の場合にはパーツ数10個、交互作用の項2個の計12個の要因を使用して評価式を作成している。回答者のアンケート結果の分散分析を行い各パーツの重みを分析した結果を表5に示す。橋梁の危険度に影響が大きい主桁、床版、橋脚・橋台・基礎、支承の重みの考え方は技術者により異なっており、数多くの損傷ケース数についてアンケートを実施することよりも数多くの技術者にアンケートを実施することが重要であることを示唆している。しかし、本研究で得られた平均の重みの値は文献1)および4)と比較しても妥当な値と思われる。6名のアンケート結果の平均値と実験計画法およびニューラルネットワークの各方法により得られた評価結果の比較を図2に示す。この図より明らかなごとく実験計画法およびニューラルネットワークの両手法ともにアンケート結果とよく一致している。2つの手法を最適補修計画問題へ適用する観点から検討を行うと、ニューラルネットワークでは重みが小さい地覆や舗装を補修した場合すなわち損傷度を1.0とした場合に危険度が若干増加する矛盾した感度解析結果が得られる場合が見られた。このことよりニューラルネットワークを最適補修計画問題へ適用する場合には、さらに教師データ数を増やし学習させ精度を上げる必要がある。一方、実験計画法では鋼橋の評価式を式(13)にコンクリート橋の評価式を式(14)に示したごとく、危険度の評価式が各パーツの損傷度の陽関数として表現されているため各パーツを補修・補強した場合の感度の計算を容易にかつ正確に行うことができる。このことより本研究では、5.で述べる最適補修パーツ選定問題へ適用する場合の危険度評価法として実験計画法の評価式を用いることとした。鋼橋の危険度の推定式

$$f_s = 3.942$$

$$\begin{aligned} &+0.298(E_{S1}-3)+0.231(E_{S2}-3)+0.119(E_{S3}-3) \\ &+0.211(E_{S4}-3)+0.118(E_{S5}-3)+0.055(E_{S6}-3) \\ &+0.042(E_{S7}-3)+0.033(E_{S8}-3)+0.057(E_{S9}-3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+0.042(E_{S10}-3)+0.016\left\{(E_{S1}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &+0.006\left\{(E_{S2}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}-0.003\left\{(E_{S3}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &+0.003\left\{(E_{S4}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}+0.007\left\{(E_{S5}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &+0.014\left\{(E_{S6}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}+0.008\left\{(E_{S7}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &-0.011\left\{(E_{S8}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}-0.017\left\{(E_{S9}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &-0.005\left\{(E_{S10}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}-0.087(E_{S1}-3)(E_{S2}-3) \\ &+0.021(E_{S1}-3)\left\{(E_{S2}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &+0.029\left\{(E_{S1}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}(E_{S2}-3) \\ &-0.007\left\{(E_{S1}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}\left\{(E_{S2}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

コンクリート橋の危険度の推定式

$$f_c = 3.860$$

$$\begin{aligned} &+0.310(E_{C1}-3)+0.228(E_{C2}-3)+0.235(E_{C4}-3) \\ &+0.116(E_{C5}-3)+0.036(E_{C6}-3)+0.044(E_{C7}-3) \\ &+0.038(E_{C8}-3)+0.051(E_{C9}-3)+0.030(E_{C10}-3) \\ &-0.005\left\{(E_{C1}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}+0.009\left\{(E_{C2}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &+0.016\left\{(E_{C4}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}+0.034\left\{(E_{C5}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &-0.001\left\{(E_{C6}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}+0.002\left\{(E_{C7}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &-0.033\left\{(E_{C8}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}-0.040\left\{(E_{C9}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &-0.014\left\{(E_{C10}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}-0.088(E_{C1}-3)(E_{C2}-3) \\ &+0.017(E_{C1}-3)\left\{(E_{C2}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \\ &+0.020\left\{(E_{C1}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}(E_{C2}-3) \\ &-0.024\left\{(E_{C1}-3)^2-\frac{8}{3}\right\}\left\{(E_{C2}-3)^2-\frac{8}{3}\right\} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、

E_{S1}, E_{C1} : 主桁の損傷度, E_{S2}, E_{C2} : 床版の損傷度, E_{S3} : 二次部材の損傷度, E_{S4}, E_{C4} : 橋脚・橋台・基礎の損傷度, E_{S5}, E_{C5} : 支承の損傷度, E_{S6}, E_{C6} : 落橋防止システムの損傷度, E_{S7}, E_{C7} : 高欄の損傷度, E_{S8}, E_{C8} : 地覆の損傷度, E_{S9}, E_{C9} : 伸縮装置の損傷度, E_{S10}, E_{C10} : 舗装の損傷度

以上より、橋梁の危険度評価は、まず各パーツの損傷状況調査を行い、ニューラルネットワークを用いて各パーツの損傷度を評価し、得られた損傷度を式(13)および(14)に代入することにより容易に行うことができる。

5. 最適補修パーツの選定法

本研究では、補修計画の最も基本となる限られた予算のもとで、LCCを考慮しない場合の最適な補修パーツを選択する問題を取り扱う。最適補修パーツの選定問題を橋梁の補修予算 $\bar{C}$ のもとで、鋼橋の重要度 W_s を考慮した危険度評価関数 f_s およびコンクリート橋の重要度 W_c を考慮した危険度評価関数 f_c の和を最小とする補修および補強パー

ツを選定する問題として定式化した。すなわち、

Find X_s, X_c , which

$$\text{minimize } F(X_s, X_c) = \sum_{i=1}^n W_{si} f_{si}(E_s) + \sum_{i=1}^m W_{ci} f_{ci}(E_c) \quad (15)$$

$$\text{subject to } C(X_s, X_c) \leq \bar{C} \quad (16)$$

$$X_{si} \in \{0,1\} \quad (i=1,\dots,n), X_{ci} \in \{0,1\} \quad (i=1,\dots,m)$$

ここに、 X_s, X_c は鋼橋及びコンクリート橋の補修・補強パーツの決定変数であり、補修・補強する場合0、補修・補強しない場合1の離散値となる。 n, m はそれぞれ損傷した鋼橋及びコンクリート橋の数である。 E_s, E_c はそれぞれニューラルネットワークにより決定した鋼橋10パーツおよびコンクリート橋9パーツの損傷度を示す。

上記の0-1計画問題の解法としてこれまでに遺伝的アルゴリズムが主として用いられており、その有効性が明らかにされているが、本研究では、目的関数が陽な関数として表されているため感度係数が容易に求まること、いかなる初期条件からでも同一の最適解が得られ解の信頼性が高いことより分枝限定法を用いることとした。分枝限定法のアルゴリズムは長年研究されてきているが、本研究では基本的にHuang¹¹⁾およびTseng¹²⁾により改良されているアルゴリズムに従い、以下に述べるフローチャートにより最適化を行っている。

Step1: 補修決定変数をすべて連続型変数と仮定して、原問題を最適化手法を用いて解く。最適化手法として本研究では双対法¹³⁾を用いた。

Step2: 原問題の解が離散解ならば計算を終了する。そして、この解を最適解として保存して計算を終了する。そうでない場合はStep3へ進む。

Step3: 分枝操作を行う補修決定変数は次の規準によって選択される。(i) 補修決定変数がすでに分枝操作が行われた場合は、その補修決定変数を分枝操作しない。(ii) すべての補修決定変数が分枝操作に使用されている場合には、一度分枝操作された補修決定変数も再度分枝操作の対象にする。(iii) 補修決定変数を0とした場合の目的関数値と1とした場合の目的関数値の差の絶対値が最も大きくなる変数に着目して分枝操作を行う。

Step4: Step3で決定した分枝操作を行う補修決定変数 X_i の値は $0 < X_i < 1$ の間に位置するため、下階層に $X_i \leq 0$ または $X_i \geq 1$ の制約条件を付加した一対の部分最適化問題を作成する。

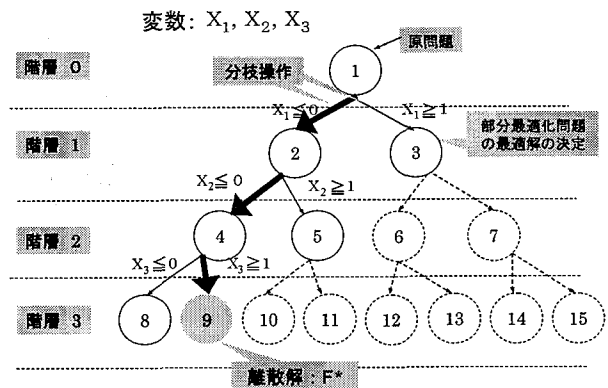
Step5: 現在の階層についてStep3からStep4の操作を行いすべての部分最適化問題を作成する。

Step6: Step3からStep5で作成した部分最適化問題を解く。解くべき部分最適化問題の数が無の場合計算を終了する。最適解はこれまでの計算で得られている暫定最適解とな

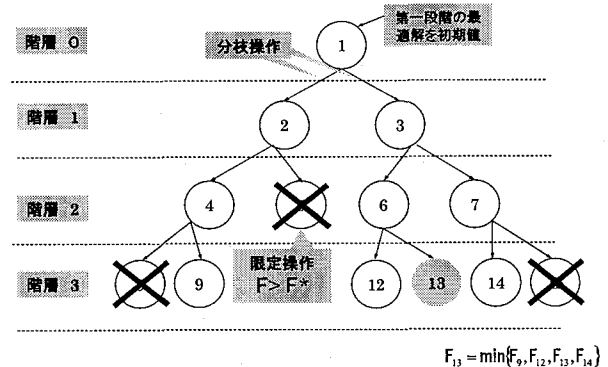
る。

Step7: Step6で解いた解が実行不可能ならば、この枝について以降の分枝操作を終了しStep10へ進む。Step6で解いた解が実行可能かつ離散解ならばStep8へ進む。Step6で解いた解が実行可能かつ離散解でないならばStep9へ進む。

Step8: 次の規準をチェックする。(i) 暫定最適解の目的関数 F^* が存在しない場合には、 $F^*=F$ としてこの解を離散解として保存しこの枝の分枝操作を終了しStep10へ進む。(ii) 暫定最適解の目的関数 F^* が存在し、 $F^* \leq F$ である場合には、この枝の分枝操作を終了しStep10へ進む。(iii) 暫定最適解の目的関数 F^* が存在し、 $F^* > F$ である場合には、 $F^*=F$ として暫定最適解を更新しこの枝の分枝操作を終



(a) 第一段階の分枝限定法



(b) 第二段階の分枝限定法

図-3 二段階の分枝限定法

表-6 各パーツの補修補強内容および費用 (単位千円)

パーツ	補修・補強内容	鋼橋	コンクリート橋
主桁	主桁補強	450/t	40/m ²
床版	新床版建設	100/m ²	100/m ²
二次部材	対傾構取替え	35/t	
橋脚・橋台・基礎	柱補強	40/m ²	40/m ²
支承	杵交換	3000/1箇所	5000/1箇所
落橋防止	移動制限装置設置	500/1箇所	500/1箇所
高欄	高欄設置	35/m	35/m
地覆	地覆設置	20/m	20/m
伸縮装置	ジョイント交換	150/m	150/m
舗装	オーバーレイ	4/m ²	4/m ²

表-7 鋼橋およびコンクリート橋の70橋～80橋目の設定した損傷度および補修・補強費用

橋梁番号	主桁		床版		二次部材		橋脚	支承	落橋防止	高欄	地覆	伸縮装置	舗装	危険度 費用	橋長	幅員	鋼重量	面積	径間 数
	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆													
ST-70	損傷度	2.46	1	1	1	1	1	1	2.14	2.74	3.63	1	2.31	20	7	38	140	1	
	費用(千円)	8550							700	400	1575		11225						
ST-71	損傷度	2.91	1	1.81	2.33	1.69	1	1	2.58	1	1	1	2.75	31	5	180	155	2	
	費用(千円)	81000		22	1400	6750			620				89792						
ST-72	損傷度	1.13	3.45	1	1	2.46	3	1	2.65	1	2.89	1	2.72	19	11	210	209	1	
	費用(千円)	23625	15675			15000	2500		380		418	57598							
ST-73	損傷度	1	1	1.37	3.77	1	3.05	1	1	3.66	3.34	2.07	73	8	116	584	3		
	費用(千円)			77	4200		9000			3600	1752	18629							
ST-74	損傷度	2.03	3.91	1	1	3.99	1.6	3.61	1	1	1	1	2.93	24	13	144	312	1	
	費用(千円)	32400	23400			22500	1250	1260					80810						
ST-75	損傷度	2.13	1	2.73	1	1	1	3.71	3.61	1	3.71	1	2.35	24	16	80	384	1	
	費用(千円)	18000		84				1260	720		1152	21216							
ST-76	損傷度	1	2.72	2.52	2.52	2.66	1	1	1	4.06	1	2.9	66	8	68	528	3		
	費用(千円)		26400	139	2800	24000				4800		58139							
ST-77	損傷度	1	1	1	4.22	1	3.5	1	2.48	3.62	2.68	2.21	60	11	95	660	3		
	費用(千円)				5600		11250		1200	4950	1320	24320							
ST-78	損傷度	1.36	2.36	2.93	1.77	1	1	2.99	1	1	1	1	2.37	61	11	162	671	3	
	費用(千円)	54675	33550	171	1400			2135				91931							
ST-79	損傷度	1	2.56	1	2.21	1	1.66	1	1	2.66	3.02	2.44	75	9	165	675	4		
	費用(千円)		33750		4200		4000			3375	2025	47350							
ST-80	損傷度	1.93	2.55	1	3.14	4.13	1	3.25	1	3.47	1	3.19	56	10	114	560	3		
	費用(千円)	38475	28000		4200	48000		2940		4500		126115							
CN-70	損傷度	2.54	2.89		3.11	3.49	1	1	1	1	3.2	1	3.32	38.7	4		154.8	3	
	費用(千円)	3096	7740		4200	45000					1800	61836							
CN-71	損傷度	1	1		1	3.74	3.33	2.12	2.48	4	1	1.88	13	6		78	1		
	費用(千円)					22500	1500	455	260	1350		26065							
CN-72	損傷度	2.59	1		1	1	2.51	1	1	2.63	1.65	2.64	9	5.5		49.5	1		
	費用(千円)	990					1000			825	50	2865							
CN-73	損傷度	1	3.17		2.51	3.46	1	1	1.82	2.2	1	3.1	40	11.5		460	3		
	費用(千円)		34500		2800	75000			400	3450		116150							
CN-74	損傷度	3.6	4.53		1	3.15	1	2.74	1	3.91	2.53	3.69	10.4	5.5		57.2	1		
	費用(千円)	1716	5720			22500		364		1238	114	31652							
CN-75	損傷度	1	2.74		4.38	4.07	1	2.31	3.61	2.26	1	3.58	42	7.5		315	3		
	費用(千円)		15750		5600	80000		1470	1260	2250		106330							
CN-76	損傷度	3.25	1		1	1	2.68	3.28	1	1	1	2.81	10	5.5		55	1		
	費用(千円)	1650					1000	525				3175							
CN-77	損傷度	1	1		2.78	3.32	1.88	1	2.84	3.58	2.53	2.24	26	7		182	2		
	費用(千円)				1400	45000	1125		520	2363	364	50772							
CN-78	損傷度	1	1		3.53	1	1	2.89	2.65	1	1	1.89	38	9		342	3		
	費用(千円)				4200			1330	760			6290							
CN-79	損傷度	2.71	2.38		1	1	1	4.75	1	1	2.53	2.67	14	8		112	1		
	費用(千円)	2240	5600					980			224	9044							
CN-80	損傷度	1	1		1	1	2.35	2.34	2.56	3.74	1	1.65	13	10		130	1		
	費用(千円)						1500	455	260	2250		4465							

了しStep10へ進む。

Step9: 次の規準をチェックする。(i) 暫定最適解の目的関数 F^* が存在しない場合には、この枝の分枝操作を継続しStep10へ進む。(ii) 暫定最適解の目的関数 F^* が存在し $F^* \leq F$ である場合には、この枝の分枝操作を終了しStep10へ進む。(iii) 暫定最適解の目的関数 F^* が存在し、 $F^* > F$ である場合には、この枝の分枝操作を継続しStep10へ進む。

Step10: Step7, Step8, Step9で判定した結果に基づき以降の分枝操作を行うことができる枝に着目し、Step3に戻る。

ところで、分枝限定法により大規模な離散最適化問題を解く場合には、解くべき問題の数をいかに減少させるかが重要な問題となる。そこで本研究では、図-3に示す二段階の分枝限定法のアルゴリズムを用いることにより、解くべき問題数を削減し、効率的かつ正確に解が得られるようにした。すなわち、第一段階として分枝操作により得られた一対の部分最適化問題を解き、その目的関数が小さくなる幹のみに着目して分枝操作を行い離散解を先行して求める。次に第二段階では初期値として第一段階において得られた離散解を用い、第一段階により得られた離散解を暫定最適解として限定操作のしきい値として用い、step1～step10

表-8 単位費用当たりの平均的な危険度の減少度

パーツ	鋼橋		コンクリート橋	
	損傷パーツ数	単位費用当たりの危険度の減少	損傷パーツ数	単位費用当たりの危険度の減少
主桁	50	1.23×10^{-5}	56	15.37×10^{-5}
床版	57	3.10×10^{-5}	58	4.74×10^{-5}
二次部材	54	230.94×10^{-5}		
橋脚	56	14.15×10^{-5}	51	12.10×10^{-5}
支承	48	0.87×10^{-5}	58	0.34×10^{-5}
落橋防止	48	1.05×10^{-5}	52	4.89×10^{-5}
高欄	48	3.14×10^{-5}	55	5.09×10^{-5}
地覆	47	9.96×10^{-5}	58	33.03×10^{-5}
伸縮装置	50	4.53×10^{-5}	58	9.05×10^{-5}
舗装	46	8.38×10^{-5}	54	16.29×10^{-5}

の操作によりしきい値より小さくなるすべての問題について分枝操作を行うことにより正確な最適解を求めている。分枝操作は、目的関数に最も影響を与える変数から順に行っているため、一般に第一段階の分枝限定法では変数の数のおよそ1/10程度の数の最適化問題を解くことにより離散解を決定することができる。第二段階では、第一段階で得られた暫定最適解のしきい値が有効に作用し解くべき問題の数を大幅に削減することができた。

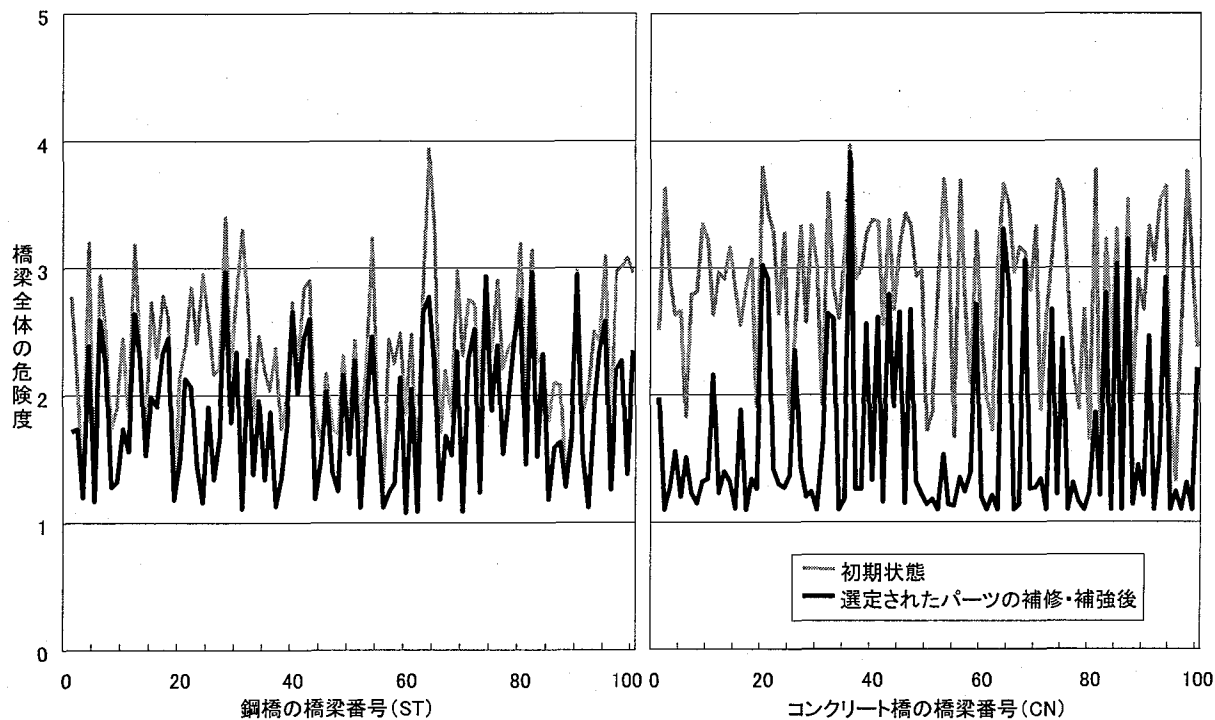


図4 橋梁の重要度を考慮しない場合の初期状態の危険度および最適補修項目を補修・補強した場合の危険度の比較

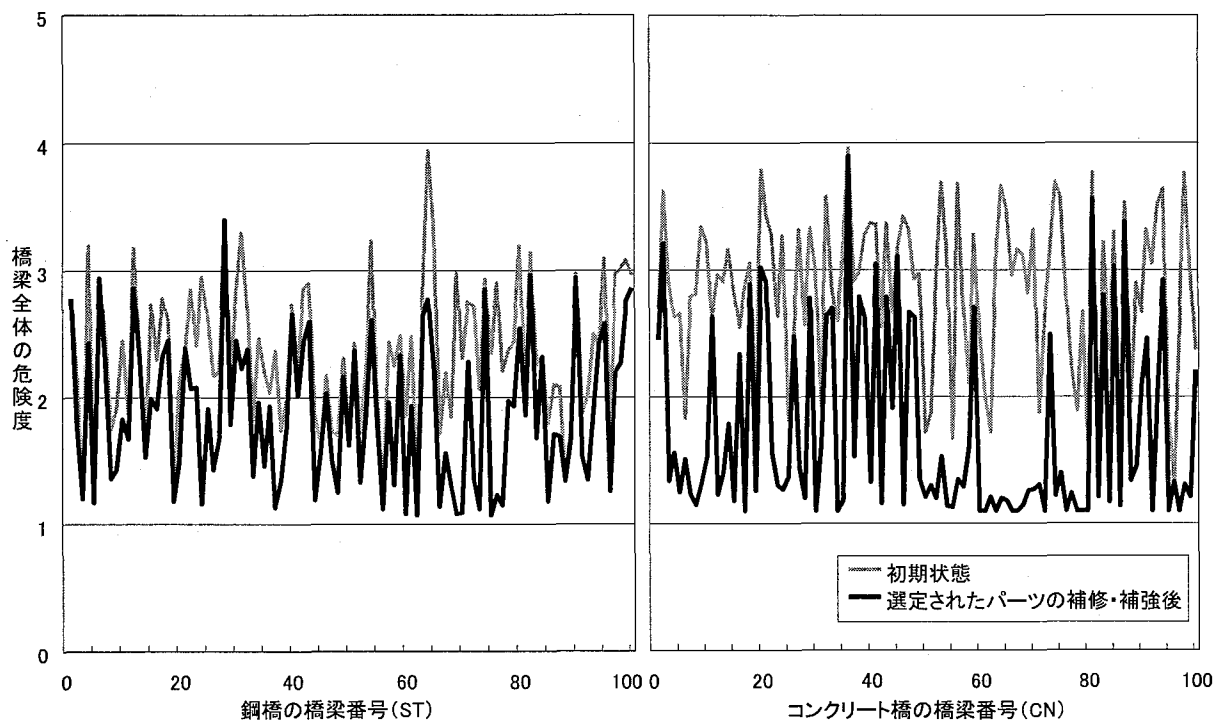


図5 橋梁の重要度を考慮した場合の初期状態の危険度および最適補修項目を補修・補強した場合の危険度の比較

6. 計算例

本研究では、これまで述べた方法の有効性を示すため、地方公共団体で管理している橋梁の内損傷していると想定される橋梁数程度の鋼橋100橋、コンクリート橋100橋を考慮し、1橋あたりの損傷しているパーツを平均5個程度仮定し、全体で1004個の補修決定変数を有する大規模な

最適補修パーツ決定問題の計算例について述べる。鋼橋では幅員を4m～17m、橋長15m～75mの単純および連続桁橋を、コンクリート橋では幅員4m～12.7m、橋長10m～45mの単純床版橋を仮定した。パーツの損傷度は、表-1の損傷項目の値をランダムに1～5の値を設定し、3で構築したニューラルネットワークを用いて求め、橋梁全体の危

表-9 鋼橋およびコンクリート橋の70橋～80橋目の補修・補強後の損傷度および危険度

番号	重み	主桁	床版	二次部材	橋脚	支承	落橋防止	高欄	地覆	伸縮装置	舗装	危険度
ST-70	1.0	1	1	1	1	1	1	2.14	1	1	1	1.09
	3.0	1	1	1	1	1	1	2.14	1	1	1	1.09
ST-71	1.0	2.91	1	1	1	1.69	1	1	1	1	1	2.28
	3.0	2.91	1	1	1	1.69	1	1	1	1	1	2.28
ST-72	1.0	1.13	3.45	1	1	2.46	3	1	1	1	1	2.52
	3.0	1.13	1	1	1	2.46	3	1	1	1	1	1.35
ST-73	1.0	1	1	1	1	1	3.05	1	1	1	3.34	1.24
	3.0	1	1	1	1	1	3.05	1	1	1	1	1.12
ST-74	1.0	2.03	3.91	1	1	3.99	1.6	3.61	1	1	1	2.93
	3.0	2.03	3.91	1	1	3.99	1.6	1	1	1	1	2.85
ST-75	1.0	2.13	1	1	1	1	1	3.71	1	1	1	1.88
	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.07
ST-76	1.0	1	2.72	1	1	2.66	1	1	1	4.06	1	2.39
	3.0	1	1	1	1	2.66	1	1	1	1	1	1.23
ST-77	1.0	1	1	1	1	1	3.5	1	2.48	3.62	2.68	1.54
	3.0	1	1	1	1	1	3.5	1	1	1	1	1.15
ST-78	1.0	1.36	2.36	1	1	1	1	2.99	1	1	1	1.97
	3.0	1.36	2.36	1	1	1	1	2.99	1	1	1	1.97
ST-79	1.0	1	2.56	1	2.21	1	1.66	1	1	2.66	3.02	2.44
	3.0	1	2.56	1	1	1	1.66	1	1	1	1	1.93
ST-80	1.0	1.93	2.55	1	1	4.13	1	3.25	1	3.47	1	2.75
	3.0	1.93	2.55	1	1	4.13	1	3.25	1	1	1	2.54
CN-70	1.0	1	1	1	1	3.49	1	1	1	1	1	1.27
	3.0	1	1	1	1	3.49	1	1	1	1	1	1.27
CN-71	1.0	1	1	1	1	3.74	1	2.12	1	1	1	1.34
	3.0	1	1	1	1	3.74	1	1	1	1	1	1.31
CN-72	1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
CN-73	1.0	1	3.17	1	1	3.46	1	1	1	2.2	1	2.67
	3.0	1	3.17	1	1	3.46	1	1	1	1	1	2.49
CN-74	1.0	1	1	1	1	3.15	1	1	1	1	1	1.22
	3.0	1	1	1	1	3.15	1	1	1	1	1	1.22
CN-75	1.0	1	2.74	1	1	4.07	1	2.31	1	1	1	2.44
	3.0	1	1	1	1	4.07	1	2.31	1	1	1	1.40
CN-76	1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
CN-77	1.0	1	1	1	1	3.32	1.88	1	1	1	1	1.31
	3.0	1	1	1	1	3.32	1	1	1	1	1	1.24
CN-78	1.0	1	1	1	1	1	1	2.89	1	1	1	1.16
	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
CN-79	1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10
CN-80	1.0	1	1	1	1	1	2.35	2.34	1	1	1	1.23
	3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.10

危険度は、式(13)および(14)にパーツの損傷度を代入して求めている。各パーツの補修・補強の費用は損傷程度や損傷箇所により異なるが、本研究では別途調査を行った結果表-6に示す補修・補強方法および単位費用を設定した。各パーツの補修・補強費用は、仮定した橋長、幅員、主桁本数、径間数を考慮して得られた結果に損傷度が1.0～2.0の場合0.25、2.0～3.0の場合0.5、3.0～4.0の場合0.75、4.0～5.0の場合1.0の係数を乗じて計算し、各損傷度に対する補修・補強費用を簡易的に求めている。鋼橋およびコンクリート橋の70橋～80橋目(ST70～80,CN70～80)の設定した損傷度および補修・補強費用を表-7に示す。またすべての橋梁についてパーツ毎に補修・補強した場合の単位補修費用あたりの平均的な危険度の減少度を表-8に示す。補修パーツを全て補修・補強した場合の総補修・補強費用は111億87万1千円であり、本研究では補修予算を10億円と設定している。

目的関数の重要度 W_s 、 W_c の値をすべての橋梁に対し1.0と設定し、橋梁の重要度を考慮しない場合の初期状態の危険度の分布および補修選定パーツを補修・補強した後の危険度の分布の比較を図4に示す。この図において、橋梁番号に対する危険度の変化は意味を成さないが、初期状態に対する補修・補強後の危険度の変化を分かりやすく表現するために折れ線で表している。また、鋼橋およびコンクリート橋の70橋～80橋目の補修・補強後の損傷度および危険度を表-9の重み1.0の欄に示す。表-9において最適化計算の後、選定されたパーツは灰色で示されている。

この問題では、第一段階の分枝限定法において86個の部分最適化問題を解き暫定最適解を決定した後、二段階目では部分最適化問題が局所最適解に収束している可能性も考えて階層8までの255個の部分最適化問題すべてについて分枝操作を行い階層9以降限定操作を行ったが最終的な最適解は第一段階で得られた離散解が最適解となった。使

用した補修費用は制約条件の違反限度内の10億0055万3千円となっている。鋼橋、コンクリート橋を合計した全危険度は519.9155から348.3663へと減少し補修予算内で最大限の補修・補強効果が得られていると考えられる。選定されたパーツは鋼橋が201パーツ、コンクリート橋が309パーツとなっており、スパン長が短く鋼橋と比較して補修・補強費用が安価なコンクリート橋のパーツが比較的多く選択されている。補修・補強した場合の単位補修費用あたりの危険度の減少度が大きい鋼橋の二次部材、鋼橋およびコンクリート橋の橋脚、コンクリートの地覆および舗装はほとんど選定され妥当な結果となっている。また、コンクリートの主桁、鋼橋の地覆、鋼橋およびコンクリート橋の伸縮装置および鋼橋の舗装は、橋長の短い橋や幅員の狭い橋において選択されている。一方、補修・補強した場合の単位補修費用あたりの危険度の減少度が小さい鋼橋の主桁、支承および鋼橋の落橋防止システムはほとんど選択されない結果となっている。

ところで、緊急輸送路上の橋梁や二次災害の危険性がある跨線橋・跨道橋などの橋梁は他の橋梁よりも優先的に補修・補強を行い常に安全な状態を維持する必要がある。そこで本研究では、鋼橋、コンクリート橋ともに60~80番目の橋梁の重要度 W_i 、 W_c を3.0と他の橋梁の3倍の重みを設定し補修パーツの選定を行った。初期状態の危険度の分布および補修選定パーツを補修・補強した後の危険度の分布の比較を図5に示す。また、鋼橋およびコンクリート橋の70橋~80橋目の補修・補強後の損傷度および危険度を表9の重み3.0の欄に示す。

この問題においても、90個の部分最適化問題を解き得られた第一段階の分枝限定法の解が最終的な最適解となり、提案した二段階の分枝限定法はきわめて有効な方法であることが明らかとなった。最適解において鋼橋が184パーツ、コンクリート橋が282パーツ選択され、使用した補修費用は制約条件の違反限度内の10億0062万3千円となっている。全危険度は360.7100となり重要度を考慮しない場合ほど全危険度は改善されていないが、重要度を大きくした鋼橋およびコンクリート橋の60~80橋目は優先的に補修パーツが選択され、橋梁の危険度評価の値は重要度を考慮しない場合よりも大幅に減少している。しかし、重要度を大きくした場合においても鋼橋の主桁、鋼橋およびコンクリート橋の支承、鋼橋の落橋防止システムは選択されておらず、確実に危険度を減少させるためには重要な橋梁に関して危険度の制約条件を付加する必要があると思われる。

以上の検討より、本研究で述べたパーツの損傷度評価法、橋梁の危険度評価法および二段階の分枝限定法を組み合わせることにより大規模な最適補修パーツ決定問題の解を正確にかつ能率的に決定することができることが明らかとなった。

7. 結 論

本研究において、専門技術者でなくとも橋梁のパーツの損傷度および橋梁の危険度を容易にかつ統一的に評価することができる汎用的な評価システムを構築し、大規模な損傷橋梁群の中から補修すべきパーツを容易に選定できる最適補修パーツの選定法を確立するとともに、その方法の有効性および実用性を示した。本研究により得られた結論をまとめると次のとおりである。

- (1) 直交表を利用して予め設定した27ケースについて各パーツの損傷度に関するアンケートおよび橋梁の危険度に関するアンケートの二種類のアンケートを実施することにより、いかなる損傷状況に対してもパーツの損傷度評価および橋梁の危険度評価を行うための基本となるデータを得ることができた。
- (2) アンケート結果に基づきパーツの損傷度評価を実験計画法およびホログラフィックニューラルネットワーク（ニューラルネットワーク）で行った結果、ニューラルネットワークの方がアンケート結果に対してより精度よく評価することができ、より汎用的な方法であることが明らかとなった。
- (3) アンケート結果に基づき橋梁の危険度評価を実験計画法およびニューラルネットワークで行った結果、両手法ともにアンケート結果に対して精度よく評価することができた。
- (4) 実験計画法による危険度評価法は、危険度の評価式が各パーツの損傷度の陽な関数として表現されているため、各パーツを補修・補強した場合の感度の計算を容易にかつ正確に行うことができることが明らかとなった。
- (5) ニューラルネットワークによる危険度評価法は重みが小さい地覆や舗装を補修した場合に危険度が若干増加する矛盾した感度解析結果が得られる場合が見られた。しかし、ニューラルネットワークでは今回構築したネットワークを基本とし、さらに教師データ数を増やし学習させることにより最適補修計画問題へも適用することが可能となり、より正確に危険度評価を行うことができることが期待できる。
- (6) ニューラルネットワークによるパーツの損傷度評価法、実験計画法により橋梁の危険度評価法および分枝限定法を組み合わせることにより、限られた予算内で危険度を最小とする最適補修パーツを決定できることが明らかとなった。
- (7) 本研究で述べた二段階の分枝限定法を用いることにより、解くべき部分最適化問題の数を大幅に削減することができ、大規模な最適補修パーツ決定問題の解を厳密にかつ能率的に決定することができることが明らかとなった。
- (8) 重要な橋梁の重みを大きくして最適化を行うことにより優先的に補修パーツを選定することができた。しかし、確実に重要な橋梁の危険度を減少させるためには

危険度の制約条件を付加する必要があることが明らかとなった。

あとがき

本研究では、直交表を利用した各パーツの損傷度アンケートにおいて表-1に示した各損傷項目の水準値を5段階評価の1,3,5に設定してアンケートを作成し、実験計画法およびホログラフィックニューラルネットワークにより各パーツの損傷度の評価を行った。しかし、表-1に示した各損傷項目は互いに相関がある場合もあり、実際に適用する場合には実橋の損傷調査を行い相関を考慮した水準値の設定を行うことにより、実際の損傷状態に対してより適切な評価が行えるものと思われる。また本研究では、ホログラフィックニューラルネットワークを適用することによりアンケート結果に対して精度よく評価できることを明らかにした。ところで、教師データを用いた学習プロセスでは学習誤差最小化が汎化誤差を最小にするとは限らず、過学習の可能性も存在するため、今後実際の既存橋梁の損傷評価に適用し、汎化性について検討を行う必要がある。しかしそのような場合においても、本研究で開発したニューラルネットワークと実験計画法による推定値とを比較し、大きく異なる場合にはその推定値に関する教師データを追加して学習させることにより、より汎化性の高いシステムを構築することができるものと思われる。

参考文献

- 1) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 丹波郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp201-217, 2001
- 2) 安田登, 白木渡, 松島学, 堤知明: ニューラルネットワークに基づいたコンクリート構造物点検技術者の思考過程の評価, 土木学会論文集, No.496/V-24, pp41-49, 1994
- 3) 近田康夫, 橋謙二, 城戸隆良, 小堀為雄: GAによる既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp151-159, 1995
- 4) 近田康夫, 清水宏孝, 廣瀬彰則: ウイルス進化型GAを援用した橋梁補修計画支援に関する研究, 構造工学論文集, vol.47A, 2001
- 5) 中村秀明, 河村圭, 鬼丸浩幸, 宮本文穂: 遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる橋梁維持管理計画最適化の検証, 構造工学論文集, Vol47A, pp201-218, 2001
- 6) 古田均, 横田知則, 堂垣正博: ファジィラーニングとクラシファイアを適用した橋梁維持管理計画支援システムの構築, 構造工学論文集, Vol49A, pp233-243, 2003
- 7) Frangopol, D.M., and Estes, A.C., Integration of nondestructive evaluation, repair, reliability and life-cycle cost into an optimal bridge management strategy, Recent Advances in Bridge Engineering, Edited by U.Meier and R.Betti, EMPA, pp.377-384, 1997
- 8) 柏村孝義, 白鳥正樹, 于強: 実験計画法による非線形問題の最適化—統計的設計支援システム—, 朝倉書店, 1998
- 9) 荻原一郎, 施勤忠, 小机わかえ: 目的関数のニューラルネットワーク推定による衝撃最適設計法の開発, 日本機械学会論文集 (A編), 63巻616号 pp.2510-2517, 1997
- 10) (財)海洋架橋・橋梁調査会: 道路橋マネジメントの手引き, 平成16年8月
- 11) M.W.Huang and J.S.Arora: optimal design with discrete variables: some numerical experiments, int. j. numer. methods eng., vol.40, pp165-188, 1997
- 12) C.H.Tseng, L.W.Wang and S.F.Ling: enhancing branch-and-bound method for structural optimization, j.struct.eng. ASCE, 121, pp831-837, 1995
- 13) C.Fleury and V.Braibant: Structural optimization; a new dual method using mixed variables, Int. J. Numer. methods eng. vol.23, pp. 409-428, 1986

(2006年4月13日 受付)