

遺伝的アルゴリズムを援用した ニューラルネットワークによる耐震補強優先順位判定システム

Ordering system of retrofit priority utilizing Neural Network and Genetic Algorithm

作田 健*, 香月 智**, 杣 辰雄***, 園田 佳巨****

Takeshi SAKUDA, Satoshi KATSUKI, Tatsuo SOMA and Yoshimi SONODA

* 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

** 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

*** 工(博)中央コンサルタンツ(株)福岡支店(〒810-0062 福岡市中央区荒戸 1-1-16)

**** 工(博)九州大学助教授 大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

This paper presents an application of Genetic Algorithm combined in Neural Network System for decision maker's retrofit priority. Sometimes it has difficulty to decide and standardize an evaluation function of retrofit priority, because large variety of demands exists in the problem depending on local culture or decision maker's personality. In order to reflect these demands, the proposed method makes use of Neural Network System which studies the knowledge of engineer's judgment on the paired comparison. The proposed method evaluates very well the retrofit priority following the real priority sense of value.

Key words: Neural Network, Genetic Algorithm, judgment of paired comparison, retrofit priority

1. 緒言

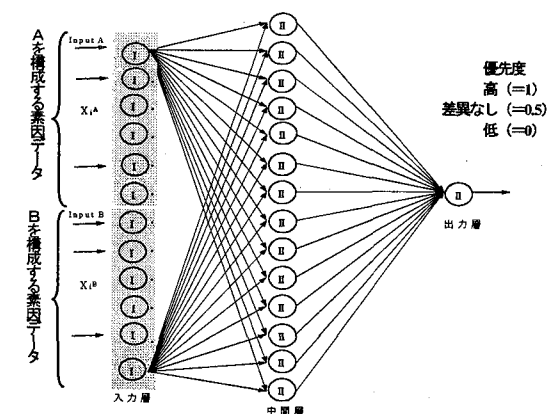
近年、供用年数の長い橋梁が年々増加しており、あと30年もすれば耐用年数を超える橋梁が全橋の約半数を占めるといわれている¹⁾。一方、1995年の阪神・淡路大震災以降、土木構造物の地震防災対策について盛んに議論されており、既設構造物の耐震補強もその一つである。土木学会第一次提言では、既設構造物の耐震補強の優先度や重要度を適切に定める必要があるとし、考慮すべき事項として①人命・生存に影響を与える度合い、②二次災害防止に影響を与える度合い、③経済活動への影響の度合い等を考慮する必要があるとしている²⁾。土木学会第3次提言³⁾では、さらに次のことを挙げている。①耐震化効率上の重要度、②平常時の機能的な重要度、③緊急時の機能的な重要度、④二次災害波及面での重要度、⑤復旧効率上の重要度、⑥施設のライフサイクルコスト、⑦地域における地震発生時の切迫度等、道路区間の耐震補強の優先順位の考え方が示されている⁴⁾。

しかし、既設基礎の補修・補強については、未だ明確な判断基準は定められていない⁵⁾。現実的には、予算や時間等のさまざまな制約条件の中で、全ての橋脚に対して補強を行うことは、事実上無理であるので、優先順位

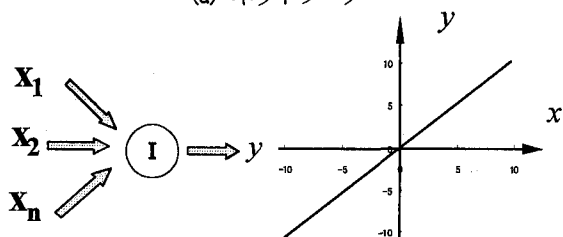
を適切に設定し、効率的に耐震補強を実施することが重要である。ただし、具体的に考慮すべき評価項目の選定や各重み付けの標準化や統一には、様々な問題が存在する⁵⁾。

例えば、大阪市では兵庫県南部地震の経験を踏まえ、市が管理する橋梁について重要度と耐震性の2つを評価軸とするマトリクスを作成し、相対評価による耐震対策工法および優先順位を設定している⁶⁾。また、永松ら⁷⁾は、平常時リンク重要度と非常時リンク耐震安全性から対策の優先順位を決定する方法を提案している。さらに、杉田ら⁸⁾は、地震発生直後の各種防災活動に対する道路交通機能の満足度合いを耐震性能指標と定義し、複数の耐震補強対策と地震交通規制の優劣比較を行う手法を提案している。

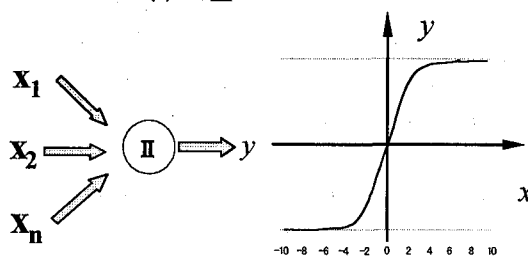
すなわち、全国的な標準化と同時に地方ごとに異なる文化や価値観を反映するという矛盾した要求が存在していることがわかる。優先順位問題は、複数の優劣判断項目に対する総合的評価による並び替え問題である。個々の項目における評価点と相対優劣判断は明確であるので、複合化された場合の項目をどのように考えるかという一見単純な問題である。最も基礎的な方法としては、優先度判定関数を各項目の加算や積算和の関数とし



(a) ネットワーク



(b) I型ニューロン



(c) II型ニューロン

図-1 相対評価ニューラルネットワーク

ておき、それぞれの項目に関する重み係数を調整して望ましいものに調整する方法であり、実務において使用されている⁹⁾。この方法は、見通しがよい利便性があるが、各重み係数を定量化するのが困難である。それは、自治体によって異なるものの実問題で9項目以上の評価項目を組み合わせているため重みの適切度は、結局総合評価で並べられた順位によって判定せざるを得ず、順位に対する部分的な修正要求に対して重み係数の調整をすることが全体のバランスを崩してしまうといった問題が生ずるからである。ちなみに、全部の順位付けを指定する要求は、問題設定上あり得ない。

AHP¹⁰⁾は、このような問題を解く際に、一対比較の判断情報を集めることによって全体の重み配分を決定する方法であり、部分的な判断情報が一対比較で容易に集積できる利点がある。しかし、価値関数を線形理論で扱うため価値観の多様性を反映できない難点がある。そこで著者らは、ニューラルネットワークに、一対比較学習情報を与えて、意思決定者の価値判断基準を取得させ、そのうえで、全橋脚の個別情報によって、全体の優先順位を決定するシステムを提案した¹¹⁾。このシステムは、

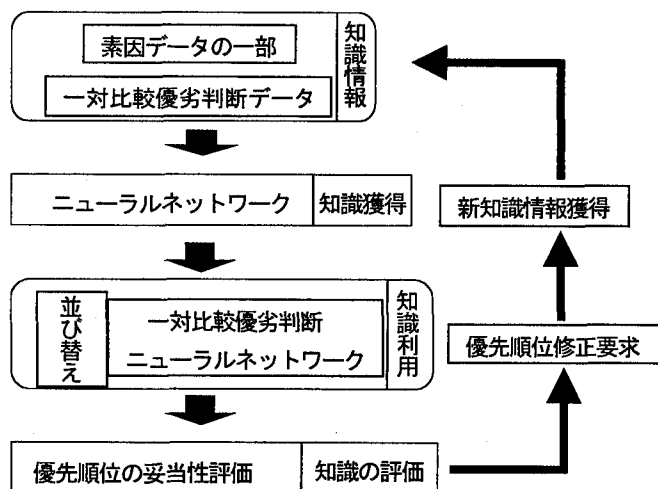


図-2 一対比較ニューラルネットワークによる優先順位柔軟に学習情報を取り入れることができるので、地域的に異なる、または、時間の推移によって異なる評価項目種類や数の変化にも対応できる利点がある。しかし、一対比較学習データは、技術者へのアンケートなどによって取得されるため、意思決定者（技術者）の負担を軽減するためには学習データ数は少ない方が望ましく、その際、意思決定者の価値基準を効率よく取得させるために、適切な一対比較組み合わせ群を抽出する必要がある。しかし、この抽出問題では、膨大な数の中から抽出基準に適合する組み合わせ解を探索するものであり、情報処理技術の援用なしに抽出基準に適合する組み合わせ解を探索することは困難である。しかし、その解決法は未解決であった。

そこで本研究は、一対比較学習データの抽出に遺伝的アルゴリズムを援用したニューラルネットワークによる耐震補強優先順位判定システムを提案し、その有用性について基礎的な検討を行ったものである。

2. ニューラルネットワークによる提案システム

2.1 全体システム

提案システムは、リスク関数の意義が相対評価能力にあることに着目する。そのうえで、図-1に示すような、2つの橋脚に関する素因データを与えると、どちらの橋脚の優先度が高いかを判定する一対比較型のニューラルネットワークシステムを構築することにより、図-2に示すように、予め一部の素因データに対する優劣の判断基準データを与えて学習させた後、判定すべき全橋脚データに対する優先順位を決定するシステムである。この特徴は、得られた優先順位に修正の必要がある場合には、その優劣判断の変更情報が、新しく獲得された知識情報として、直接的にニューラルネットワークの学習情報に加えることができるため、柔軟にシステムの更新を図ることができる点にある。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A		○	○	○	○	○	○	○	○	○
B	×		○	○	○	○	○	○	○	○
C	×	×		○	○	○	○	○	○	○
D	×	×	×		○	○	○	○	○	○
E	×	×	×	×		○	○	○	○	○
F	×	×	×	×	×		○	○	○	○
G	×	×	×	×	×	×		○	○	○
H	×	×	×	×	×	×	×		○	○
I	×	×	×	×	×	×	×	×		○
J	×	×	×	×	×	×	×	×	×	

■ 既知データ □ 判断データ

図-3 一対比較判断表

さて、一対比較型システムによる順位決定問題の特質について、図-3 の例を用いて詳述する。図-3 には、橋脚名をアルファベットの A~J で表している。便宜上、このアルファベットオーダーと優先順位が一致しているものとする、一対比較において、行が列に対して優位である場合に○、逆を×とすると、明らかに右上の三角形領域が○、左下が×となるべきである。さて、図-2 で示すシステムにおけるニューラルネットワークでは、この一部、例えば表中の網掛け部分のデータを既知データとして学習させ、他の部分を正確に推定することが望まれる。既知データとは、具体的には予め技術者がアンケートなどの手間をかけて与えるものである、なるべく少ない数であることが望ましい。

2.2 自明比較学習データの自動取得

一対比較優劣判断結果が自明である場合には、アンケートなどによる技術者の判断を仰がずとも学習データに加えることができる。図-4 は、自明比較データと非自明比較データの説明をしたものである。図-4(a) の a 橋と b 橋のデータでは、①~⑨のいずれの評価項目においても b 橋の評価の方が大きい、または、同等であるので b 橋の方が総合判断として評価が大きくなることは、自明である。一方、図-4(b) の場合には、項目②と④において、評価が逆転しているので、技術者が項目②と④のどちらを重視するかによって優劣判断が異なる。図-4(c) には、2 次元区間における自明・非自明比較データの領域区分を示している。すなわち、a 橋に対して比較対象が a データ点を中心として相対的に 1・3 象限領域に存在すると、優劣は自明であり 2・4 象限にあると、非自明となる。非自明領域のどこかに技術者の優劣判断境界線があり、その境界線が線形であれば、AHP などの手法が有効であり、非線形な場合には、ニューラルネットワークなどの手法が必要である。

2.3 非自明比較学習データの抽出

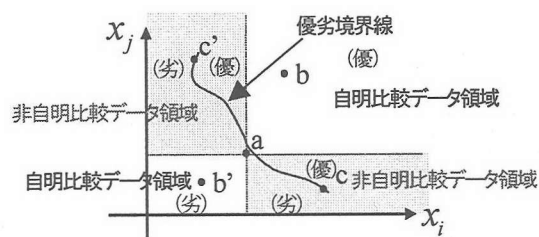
自明比較データを自動的に学習データとして取得することになると技術者の判断をあおぐ学習データは非自明比較学習データの中から抽出することになる。文献 11) では、①ランダムに抽出することでは全体系を適切に評価することができない。②抽出ルールの一案として、学習データ内の各々の橋脚出現回数が均等であり、比較デ

橋梁	調査項目								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
a	4	1	1	2	1	1	5	3	1
b	4	1	2	2	2	1	5	4	2

(a) 自明比較データ

橋梁	調査項目								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
a	1	1	1	2	1	3	1	2	4
c	1	2	1	1	1	3	1	2	4

(b) 非自明比較データ



(c) 領域区分

図-4 自明・非自明比較データ

ータ間のユークリッド距離が小さい場合に良好な結果が得られることを示した。しかし m 個の非自明比較データ群の中から k 個抽出データを得る解候補数は、 ${}_m C_k$ であり $m = 100$, $k = 30$ としても天文学的数字となって正攻法で解を得ることができない。そこで、本研究では、遺伝的アルゴリズム¹²⁾を応用することにした。その際、次の4通りのルールについて評価した。

(1) 出現回数が均等でユークリッド距離最小

(ルール I)

橋脚出現回数の均等性は、出現回数のばらつき（標準偏差）の大きさによって評価できる。すなわち、均等であるとは、

$$\sigma_n \rightarrow \min \quad (1)$$

逆に均等でないとは、

$$\sigma_n \rightarrow \max \quad (2)$$

ここで、

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (n_{ai} - \bar{n}_a)^2}{n}} \quad (3)$$

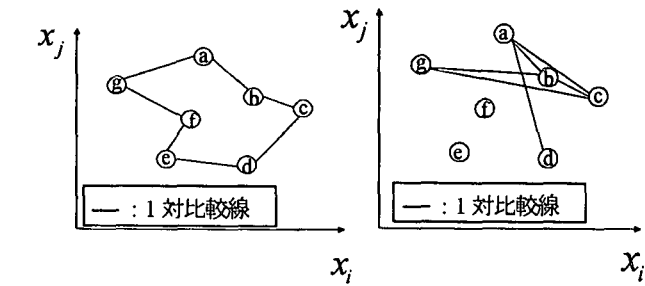
n_{ai} : i 番目橋脚の出現回数, $\bar{n}_a$: 平均出現回数, n : 橋脚数。

ユークリッド距離の最小とは、次式で表される。

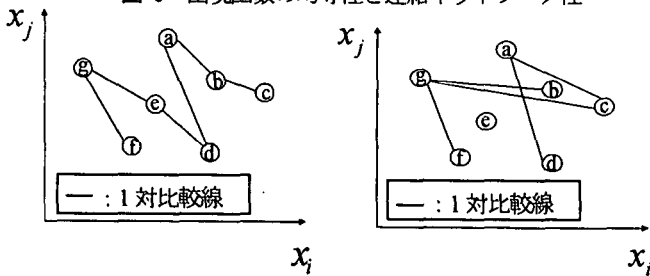
$$\ell_T = \sum_{j=1}^k \ell_j \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\ell_j = \sqrt{\sum_{q=1}^p (x_{Rq} - x_{Sq})^2} \quad (5)$$

ここで、 ℓ_T : 連結線の総和距離, k : 抽出データ数, ℓ_j : j 番目の一対比較データ間のユークリッド距離, p : データの次元数, $\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S$: j 番目の一対比較データ R と S



(a) 出現回数均等 (b) 出現回数不均等
図-5 出現回数の均等性と連結ネットワーク性



(a) 近距離比較 (b) 遠距離比較

図-6 比較線距離の相違

のデータベクトル。

よって、出現回数均等でユークリッド距離最小の目的関数は、最大化問題として次式となる。

$$\frac{C_{\sigma}}{\sigma_n} + \frac{C_{\ell}}{\ell_T} \rightarrow \max \quad (6)$$

ここで、 C_{σ}, C_{ℓ} : それぞれ σ_n, ℓ_T 項の数値オーダーを調整する係数。

(2) 出現回数不均等でユークリッド距離最小 (ルールⅡ)

$$C_{\sigma}\sigma_n + \frac{C_{\ell}}{\ell_T} \rightarrow \max \quad (7)$$

(3) 出現回数均等でユークリッド距離最大 (ルールⅢ)

$$\frac{C_{\sigma}}{\sigma_n} + C_{\ell}\ell_T \rightarrow \max \quad (8)$$

(4) 出現回数不均等でユークリッド距離最大 (ルールⅣ)

$$C_{\sigma}\sigma_n + C_{\ell}\ell_T \rightarrow \max \quad (9)$$

ここで、式(6)～(9)の均等性について、模式的に図-5によって説明する。各データは、それぞれの評価要素 x_i, x_j の値によって $x_i \sim x_j$ 空間に点在する。ここで、比較対を線で結ぶことにより、一対比較を表すものとする。例えば、全比較対において各データが2回ずつ出現するとは、図-5(a)のように閉じた連結線を形成する。式(6)～(9)においては、出現回数の標準偏差によって均等性を表しているが、これは、図-5(a)のように各データが2回出現するというような離散整数値だけではなく中間的な値(1.5など)であっても取り扱うことを可能とするためである。

逆に不均一にすると、あるデータの出現回数が他の

表-1 補強優先度の素因変数(第1段階)

項目①	内容	重要度(x_1)	重み係数 α_1
防災計画	ネットワーク路線	3	0.0
	非ネットワーク路線	1	
項目②	内容	重要度(x_2)	重み係数 α_2
2次災害の影響度	跨線橋 跨道橋	3	0.20
	跨線橋 跨道橋なし	1	
項目③	内容	重要度(x_3)	重み係数 α_3
交通量	主要幹線道路	5	0.05
	幹線道路	3	
	補助幹線道路	1	
項目④	内容	重要度(x_4)	重み係数 α_4
迂回路	迂回路あり	3	0.15
	迂回路なし	1	
項目⑤	内容	重要度(x_5)	重み係数 α_5
適用示方書	昭和55年以前の告示	5	0.30
	昭和55年の告示	3	
	平成2年の告示	2	
	平成8年の告示	1	
項目⑥	内容	重要度(x_6)	重み係数 α_6
徑間数	2徑間以上	3	0.10
	単徑間(橋脚なし)	0	
項目⑦	内容	重要度(x_7)	重み係数 α_7
下部工補強	補強歴あり、S55年以前の施工	5	0.15
	補強歴あり、S55年～H7年までの施工	0.0001	
	補強歴あり、H8年以降の施工	0	
項目⑧	内容	重要度(x_8)	重み係数 α_8
基礎工補強	補強歴あり、S55年以前の施工	3	0.05
	補強歴あり、S55年～H7年までの施工	0.0001	
	補強歴あり、H8年以降の施工	0	
項目⑨	内容	重要度(x_9)	重み係数 α_9
落橋防止システム	補強歴あり、S55年以前の施工	5	0.0
	補強歴あり、S55年～H7年までの施工	3	
	補強歴あり、H8年以降の施工	1	

データと比して偏って多い、もしくは少ないことを示しており、図-5(b)の㉔㉕点のように連結線が集中するものや、㉔㉕点のように全く連結線が存在していない孤立点が存在することになる。文献11)では、孤立点の出現するとその周辺情報が確保できないので全体系のフィッティングが悪いとしていたが、自明比較データの連結線が補うことにより異なる結果になることもあったと考え、今回の検討パラメーターに加えた。

図-6は、総和距離の大小による相違を示している。図-6(a)の場合には、2象限または4象限を結ぶ一対比較線が6本ひかれており、一つ一つの連結線が短い。一方、図-6(b)では、個々の連結線が長くなっている。短い連結線は、その局所的な大小関係の知識獲得するのに適し、長い連結線は逆に大局的な大小関係知識を獲得する。すなわち、総和距離を小さくすることは、局所的な非線形情報を重視し、長くすることは、巨視的な判断を重視することに対応するものと考えられる。

3. 耐震補強優先順位決定問題への適用

3.1 使用データ

ここで使用するデータは、既設橋脚の優先順位を決定するために、ある自治体で用いられているものである。既設道路橋における橋脚の補強優先順位は、表-1、表-2の2段階で判断されている。

表-2 補強優先度の素因変数（第2段階）

項目⑩	内容	重要度 (y_1)	重み係数 β_1
液状化	S46年以前の道示（水際線100m内）	5	0.3
	S46年以前の道示	3	
	S46年～復旧仕様	2	
	復旧仕様、H8年の道示	1	
項目⑪	内容	重要度 (y_2)	重み係数 β_2
地盤の洗掘	洗掘が大	5	0.2
	洗掘がそれほど大きくない	3	
	洗掘が小	1	
項目⑫	内容	重要度 (y_3)	重み係数 β_3
活断層の状況	活断層あり	3	0.5
	活断層なし	1	

表-3 使用データ

No.	NAME	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	R
1	A	3	3	5	5	3	2.8686
2	B	3	5	3	5	3	2.5247
3	C	3	3	3	5	3	2.461
4	D	1	5	5	5	3	2.3623
5	E	1	3	5	5	3	2.3028
6	F	3	5	2	5	3	2.2355
7	G	3	1	2	5	3	2.0627
8	H	1	5	3	5	3	2.0267
9	I	1	3	3	5	3	1.9756
10	J	3	5	1	5	3	1.8158
11	K	3	3	1	5	3	1.77
12	L	1	3	2	5	3	1.7493
13	M	3	1	1	5	3	1.6754
14	N	1	5	1	5	3	1.4576
15	O	1	3	1	5	3	1.4209
16	P	1	1	1	5	3	1.3449
17	Q	3	5	5	0.0001	3	0.5807
18	R	1	5	5	0.0001	3	0.4661
19	S	1	3	5	0.0001	3	0.4544
20	T	1	3	5	5	0	0

重要度については、各項目（ $x_1 \sim x_9$ ）の評価要素に応じ、例えば x_3 の項目は交通量の大小に応じて、主要幹線道路（20,000台/日以上）、幹線道路（4,000台/日以上20,000台/日未満）、補助幹線道路（4,000台/日未満）の交通量を参考に上位より5点、3点、1点と点数付けが行われている。下部工および基礎工の補強済みの橋梁については、重要度は施工年度により0か、限りなく小さな値（0.0001）に設定している。

重み係数については、各項目（ $x_1 \sim x_9$ ）の橋梁の補強優先度の高いものに、大きな点数がつけられている。例えば、兵庫県南部地震後、既設鉄筋コンクリート橋脚に対して耐震補強対策の優先順位は、昭和55年より古い基準に補強を優先させている。また、跨線橋、跨道橋に対して優先的に耐震補強することを促している。すなわち、設計当時の適用示方書及び二次災害の影響に対して大きな重みを与えている。

表-1の第一段階で評価点が高いものに対し表-2の評価項目により再度評価し、優先順位を決定している。ちなみにそれぞれの評価式は次の通りである。

$$R_1 = x_1^{\alpha_1} \times x_2^{\alpha_2} \times x_3^{\alpha_3} \times x_4^{\alpha_4} \times x_5^{\alpha_5} \times x_6^{\alpha_6} \times x_7^{\alpha_7} \times x_8^{\alpha_8} \times x_9^{\alpha_9} \quad (10)$$

$$R_2 = y_1^{\beta_1} \times y_2^{\beta_2} \times y_3^{\beta_3} \quad (11)$$

しかし、この方法では、2段階による評価が必要なことや、第1段階による順位と第2段階による順位に矛盾が

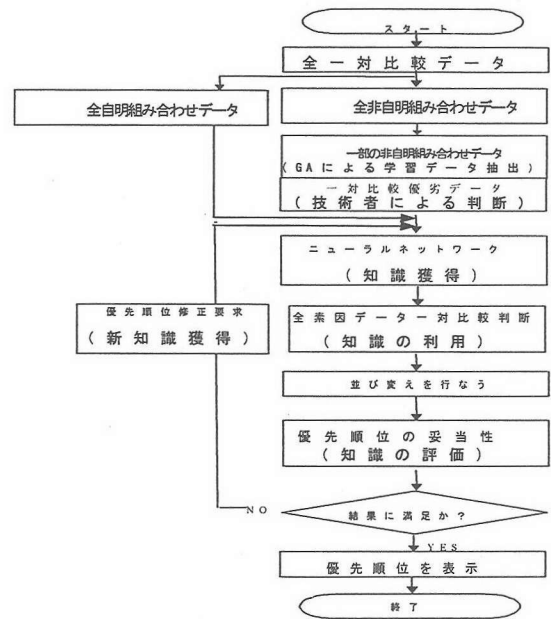


図-7 提案システムの流れ

表-4 データの分類

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A																				
B																				
C																				
D																				
E																				
F																				
G																				
H																				
I																				
J																				
K																				
L																				
M																				
N																				
O																				
P																				
Q																				
R																				
S																				
T																				

■ 自明比較データ □ 非自明比較データ

生じ、優先順位が決定しきれないなどの問題がある。

本研究は、第一段階で用いられている優先度評価式を隠し評価とし、GAで抽出した一対比較組み合わせに対して、技術者の判断として現行評価に従った一対比較優劣判断を与え、全体の評価が隠し評価と一致するかを判断する。

3.2 計算例

使用データの橋脚数は276橋であったが、異なる種類の素因データを持つものは、表-3で示す20橋5項目のデータである。識別が容易であるように、ここでも現行の優先度評価式 R による補強優先度がアルファベット順に高く並べてある。 R は、式(10)を5項目に限ると次のようになる。

$$R = x_1^{0.2} \times x_2^{0.05} \times x_3^{0.3} \times x_4^{0.15} \times x_5^{0.05} \quad (12)$$

図-7のフローチャートに従ってデータの分類を行うと、組み合わせの分類は、表-4に示すように、全組み合

表-5 GAのパラメーター

世代数	10000
初期集団数	1000
交叉確率	0.6
突然変異率	0.10
エリート交叉率	0.15
クローン排除	エリート保存

表-6 出現回数と優先順位配列

平均出現回数	優先順位
1	A-D-B-E-C-F-H-J-G-I-K-M-L-N-Q-O-P-T-R-S
2	A-D-B-E-C-F-H-J-G-I-K-M-L-N-Q-O-P-T-R-S
3	A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-K-M-L-N-O-P-Q-R-S-T

表-7 GAによる抽出データ (ルールI)

(a) GAによる抽出データ

NO.	データ	NO.	データ
1	F-H	16	B-E
2	G-K	17	D-F
3	L-N	18	L-T
4	C-H	19	M-N
5	C-J	20	A-J
6	E-H	21	F-T
7	A-D	22	I-S
8	B-D	23	A-Q
9	I-K	24	B-R
10	C-E	25	O-S
11	K-N	26	Q-T
12	M-O	27	J-R
13	G-I	28	P-S
14	L-M	29	P-R
15	G-O	30	P-Q

(b) 各橋の出現回数

NAME	出現回数
A	3
B	3
C	3
D	3
E	3
F	3
G	3
H	3
I	3
J	3
K	3
L	3
M	3
N	3
O	3
P	3
Q	3
R	3
S	3
T	3

わせ 190 組のうち自明比較組み合わせが 81 通り、非自明比較組み合わせが 109 組である。すなわち、全組み合わせの約 40%を学習データとして自動的に取得できる。自明組み合わせ 81 通りを自動的に学習させ、非自明組み合わせ 109 組から各橋脚が 3 回出現する 30 組を抽出しようとする、抽出組み合わせ候補は ${}_{109}C_{30} = 6.1 \times 10^{26}$ 組存在することになる。これをしらみつぶしに行おうとするならば、計算時間は 2GHz 程度の市販パソコンで数年間という実務上不可能な時間が必要となる。そこで、GA¹²⁾を用いて学習データのための比較対を抽出する。なお、パラメーターは、表-5に示す値を設定し、式(6)～(9)の4種類の目的関数に従い計算を行った。

(1) 学習データ抽出数と正答率

本例では、全部で 20 橋脚であるので、全アンケートにおいて、各橋脚が 1 回ずつ現れる場合には、抽出データ数 10 対のアンケートを行うことになる。そこで、総アンケート対数を 10, 15, 20, 25, 30 とパラメトリックに増やして正答率を調べた。共通して抽出ルールⅢ

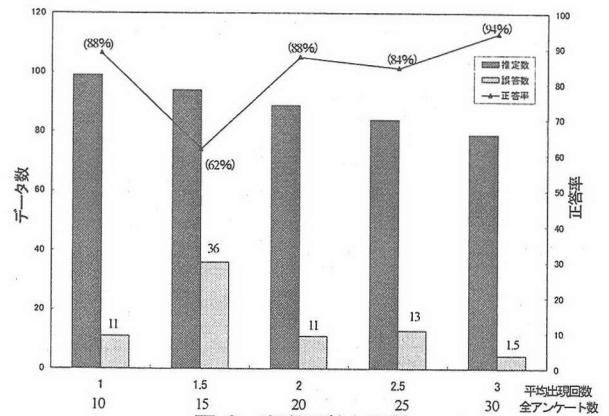


図-8 出現回数と誤数

表-8 提案システムの推定結果

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
B	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
C	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
D	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
E	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
F	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
G	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
H	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
I	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
J	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
K	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
L	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
M	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
N	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
O	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
P	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
Q	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
R	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
S	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
T	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○

(式(8))を用いている。予想組数と誤数の関係を、図-8に示す。また、得られる優先順位配列を表-6に示す。図-8において、学習データ内に個々の橋脚の出現回数が整数であるもの(1, 2, 3)に比して、整数でない場合(1.5, 2.5)は、推定判断の誤答数が相対的に多い。しかし、出現回数が整数であるものはアンケート数を増やすことで着実に誤答数は減少しており、平均して 3 回/橋脚、全 30 組の学習データでは、誤数が 2 組となっている。すなわち、正答率は 94%となっている。この結果、表-6において、平均出現回数が 3 回の学習データを与えたニューラルネットワークを用いて、全橋脚の優先順位を判定すると A~T の 20 橋脚のうち、L と M が逆順になるだけのほぼ正答をえることができる。しかし、平均出現回数 1 回の場合でも、間違いは多いものの、概して、現行の優先順位に応じた配列が得られる。

(2) 抽出ルールの影響

ここでは、全抽出数を 30 組とした上で抽出ルールによる影響を考察する。

a) ルールⅠ (式(6))

表-7(a), (b)に示す各橋脚が 3 回ずつ出現する非自明比較学習データが抽出され、そのユークリッド距離は 81.3 であった。この 30 組に技術者の判断として現行評価に従った優劣判断の学習データを与え、ニューラルネットワークにより計算を行った結果を表-8に示す。ちな

表-9 GA による抽出データ (ルールII)

(a) GA による抽出データ

NO.	データ	NO.	データ
1	G-O	16	G-L
2	G-Q	17	G-N
3	M-T	18	O-T
4	J-T	19	G-J
5	R-T	20	G-I
6	K-N	21	Q-T
7	P-T	22	G-T
8	G-R	23	E-G
9	K-T	24	L-T
10	I-T	25	F-T
11	H-T	26	G-S
12	S-T	27	C-T
13	G-H	28	I-N
14	B-T	29	G-K
15	D-G	30	N-T

(b) 各橋脚の出現回数

NAME	出現回数
A	0
B	1
C	1
D	1
E	1
F	1
G	8
H	3
I	3
J	2
K	3
L	2
M	1
N	4
O	2
P	1
Q	2
R	2
S	2
T	16

表-10 提案システムの推定結果

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A																				
B	x																			
C	x	x																		
D	x	x	x																	
E	x	x	x	x																
F	x	x	x	x	x															
G	x	x	x	x	x	x														
H	x	x	x	x	x	x	x													
I	x	x	x	x	x	x	x	x												
J	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
L	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
M	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
N	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
O	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
P	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Q	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
R	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
T	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

■ 自明比較データ ■ 非自明学習比較データ □ 推定データ

表-11 提案システムの推定結果

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A																				
B	x																			
C	x	x																		
D	x	x	x																	
E	x	x	x	x																
F	x	x	x	x	x															
G	x	x	x	x	x	x														
H	x	x	x	x	x	x	x													
I	x	x	x	x	x	x	x	x												
J	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
L	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
M	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
N	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
O	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
P	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Q	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
R	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
T	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

■ 自明比較データ ■ 非自明学習比較データ □ 推定データ

表-12 提案システムの推定結果

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A																				
B	x																			
C	x	x																		
D	x	x	x																	
E	x	x	x	x																
F	x	x	x	x	x															
G	x	x	x	x	x	x														
H	x	x	x	x	x	x	x													
I	x	x	x	x	x	x	x	x												
J	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x										
L	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
M	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
N	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
O	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
P	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Q	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
R	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
T	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

■ 自明比較データ ■ 非自明学習比較データ □ 推定データ

表-13 ルールによる比較

ルール	誤答数	σ_n	ℓ_T	優先順位
I	4.5	0	81.3	A-B-D-C-E-F-H-G-I-J-K-M-L-N-O-P-Q-T-R-S
II	9	15.5	142.4	A-B-D-C-E-F-G-H-J-K-I-L-Q-M-N-O-R-P-S-T
III	1.5	0	137.2	A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-K-M-L-N-O-P-Q-R-S-T
IV	13	15.7	193.1	A-D-B-E-F-C-H-J-I-K-N-G-L-M-O-P-Q-R-T-S
III+追加学習	0			A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-K-L-M-N-O-P-Q-R-S-T

みに中間層ニューロン 3 個で約 9000 回の学習で収束した。結果は 4 組合せのみが、隠し評価と不一致で、G-H の 1 組については曖昧な判断である。

b) ルール II (式(7))

GA は、表-9(a) に示す非自明比較データを抽出した。抽出データの各橋脚の出現回数は、表-9(b) に示すように不均等であり、ユークリッド距離は 142.4 となる。表-9(b) より、出現回数は橋脚 G, T に偏在している。この時のニューラルネットワークによる計算結果を表-10 に示す。9 組が誤答であり、ルール I の結果より明らかに悪い結果であった。これは、学習データに偏りがあるため、全体系をニューラルネットワークで的確に把握する

ことが困難であったためと考えられる。

c) ルール III (式(8))

ニューラルネットワークにより計算を行った結果は、中間層ニューロン 4 個で収束し、表-11 に示すように 1 組のみが不一致であり、D-F が曖昧な判断であったが非常に良好な結果であり、現行の評価をほぼ再現している。

d) ルール IV (式(9))

ニューラルネットワークにより計算を行った結果は、中間層ニューロン 4 個で収束し、表-12 に示すように 13 組が不一致であった。

e) 総合評価

ルール I ~ IV により得られる優先順位を表-13 に示す。

明らかに出現回数が均等なルールⅠ、Ⅲの誤答数が少なく、優先順位についても現行の順位とほぼ一致している。一方、出現回数が不均等なルールⅡ、Ⅳについては誤答数が多く、優先順位も大きく異なる。すなわち、学習データの比較対の中に各橋脚の出現回数の中に偏りがあるとユークリッド距離の大小に関わらず全体評価への適合性がよくないことがわかる。ユークリッド距離については、ルールⅡに対してルールⅣは悪くなっている。なので一般性をもって結論付けられないが、本研究の範囲では、出現回数が均等である場合には距離を大きくすることが正答率をあげるといえる。文献11)では、アンケートデータの抽出基準を変更させ正答率の変化を調べることは、全組み合わせ数が膨大であり容易ではなかった。しかし、アンケートデータの抽出にGAを援用することにより抽出基準を変更させ目的にあったアンケートデータを抽出することが可能となったため、ルールⅠ～ルールⅣといった比較ができたといえる。参考までに、ルールⅢで得られた順位が意思決定者と異なっているL-Mについて、LがMより優れているとする学習情報を加えてシステムに学習させると、表-13の最下段に示すように、AからTまで意に添った判断を示すシステムに改良される。つまり、従来の手法では、順位が意に沿わない場合には試行錯誤的に係数を変更させなければならぬのに対し、提案手法では、修正要求そのものが新学習情報となり、技術者の判断に矛盾がなければ最終的に必ず収束するところに利点がある。

4. 結言

本研究は、一部の対比較判断学習情報を遺伝的アルゴリズムにより抽出する、ニューラルネットワークを用いた橋脚補強優先順位決定システムを提案したものである。本研究において得られた成果は以下になる。

1) 対比較学習情報の中で、比較結果は自明であるものについて、自動的に学習データに加えることを提案した。これにより、本検討例では全体の約40%の比較について自動的に学習データに加えることが可能である。

2) 今回の例のように比較的数の少ない実例で190組の非自明比較データの中から、意思決定者の判断をあおぐ30組選び出すことは、 10^{26} もの組み合わせ群の中から、目的に合致する30組を選ぶことであり、遺伝的アルゴリズムの援用が必要であることを示した。

3) 非自明比較データの選出ルールとして個々の橋脚出現数の均等性とデータ空間距離について検討した。その結果、出現数は均等でデータ間の総和空間距離を大きくとるように基準を設定したものが、全体の優劣判断に最も適合する。

4) 提案システムは、得られた優先順位の中にある意に沿わない順位に対して意に沿うように追加学習させると、要求する優劣判断を得られる価値基準を修得する。

5) 本検討例では、実橋脚数が20橋と実務に比して少ないものとなっている。実務における多数の橋脚が異なる評価を有する問題への適用については検討する必要がある。

参考文献

- 1) 西川和廣：社会資本の維持管理，土木学会誌，Vol. 83，No.2, pp.35-37, 1982-2.
- 2) (社)土木学会：学会耐震基準等に関する提言集，1996. 5.
- 3) (社)土木学会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，2000. 6.
- 4) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧-震前対策編，2002. 4.
- 5) (社)土木学会 地盤工学委員会，既設構造物の耐震補強に関する研究報告書，2002.
- 6) 大阪府：大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書，1997.3.
- 7) 永松義敬，大塚久哲，松田泰治，豊永臣悟：緊急輸送路網における耐震安全性評価手法の開発，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.3407-3412, 1998.11.
- 8) 杉田秀樹，野崎智文：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究，1998.9.
- 9) M. J. N.Pristley, F. Seisble, G.M. Calvi (川島一彦監訳) 橋梁の耐震設計と耐震補強第6章 pp.365-365, 技報堂出版1998.
- 10) 木下栄蔵編著：AHPの理論と実際，日科技連 2000.
- 11) 作田健，香月智，深和岳人，杣 辰雄：橋脚補強優先順位決定問題へのニューラルネットワークの適用，構造工学論文集，2003.3.
- 12) 長屋秀和，香月智，佐藤紘志，諏訪政雄：多様性エリート保存戦略とクローン排除戦略による遺伝的アルゴリズムの特性に関する考察，構造工学論文集，Vol.46A，pp.333-344, 2000.3.

(2003年4月18日受付)