

愛媛大学工学部 正員 谷脇一弘, 愛媛大学工学部 正員 大賀水田生
 ○ZYCC (株) 米田孝行, 広島県警 井上元章

1. はじめに

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。このためには専門の技術者の育成や、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いる。このような観点から本研究では、専門技術者を対象とした数少ないケース数のアンケート結果及び実験計画法あるいはニューラルネットワークの手法を用いて、専門的な技術者でなくとも橋梁の損傷度及び危険度を容易にかつ統一的に評価することができる橋梁管理システムの開発を行ったものである。

2. パーツの損傷度評価

(1) アンケート内容

橋梁を構成する各パーツの損傷度は、現地調査による損傷状況から技術者の経験により判断しているのが現状である。本研究では、予め設定した損傷ケースについて専門の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パーツの損傷度を評価することを試みた。

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。また、アンケートに用いた各パーツの損傷項目は道路橋マネジメントの手引き¹⁾に従い設定した。アンケートでは、ケース数が少ないほど回答者の判断ミスを防止することができると考えられるため、本研究では実験計画法で用いられる直行表 $L_{27}3^{13}$ の27

ケースを1つのパーツの損傷のケース数として予め設定した。各損傷項目はそれぞれ独立して損傷が生じえるものと仮定して健全な場合を損傷度1、損傷が多くあり速やかにパーツを補修する必要がある場合を損傷度5の5段階で設定し、直行表の水準値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、6名の専門技術者に対してアンケートを実施した。

(2) 実験計画法及びニューラルネットワークによる損傷度評価および考察

鋼橋及びコンクリート橋の全てのパーツについて実施したアンケート結果を基に、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パーツ毎に損傷度の評価を行った。実験計画法による推定式²⁾では、各損傷項目の2次の項までを考慮し、交互作用の項は考慮していない。ニューラルネットワークの手法では、入力及び出力の実数を複素数空間に写像し、入力と出力を複素関数の線形結合として表現することで、ノード数や中間層の数を検討することなく共役複素数の項を考慮してマトリックスのサイズを変化させ精度よく推定することができるホログラフィックニューラルネットワーク³⁾を用いた。

図-1に鋼橋の主桁に関する27ケースの損傷度のアンケート結果(6人平均)、実験計画法及びニューラルネットワークによる評価結果を示す。

アンケート結果に対する各手法の評価値の差の2乗誤差は実験計画法では2.2243と大きいのに対し、ニューラルネットワークでは0.1615と精度よく評価されている。また実験計画法では、損傷の大きいケースは比較的精度よく評価されているのに対し、損傷度の小さいケースでは大きな差が見られた。こ

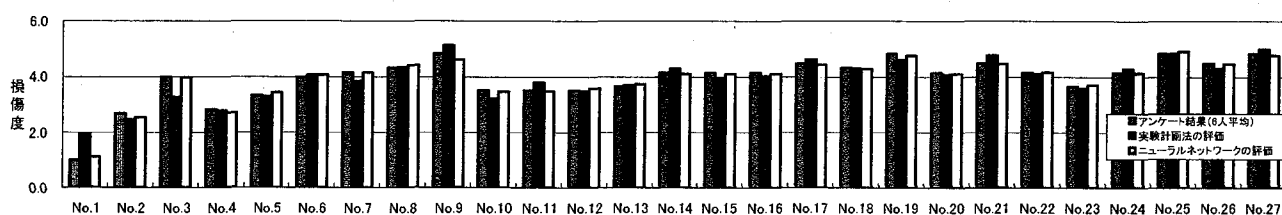


図-1 鋼橋の主桁の損傷度評価比較

これは鋼橋の主桁の場合の損傷項目が 6 項目に対して 13 項目に対応した直行表を用いたため推定式の精度が悪くなったものと考えられる。

その他の全てのパーツについても検討を行った結果、ニューラルネットワークは全般にアンケート結果との誤差が小さく精度よく評価しているのに対し、実験計画法では精度にばらつきが見られた。

これらの結果より、実験計画法では損傷項目数に対して適切な直行表を用いる必要があり、ニューラルネットワークの手法がより各パーツの損傷度評価に適した汎用的な手法と考えられる。

3. 橋梁の危険度評価

(1) アンケート内容

橋梁の損傷したパーツを補修するためには、パーツの損傷度のみならずそのパーツの損傷度が橋梁全体の危険度にどのような影響を与えているのかを評価し、危険度に影響の大きいパーツから補修を行う必要がある。既往の研究では、橋梁の危険度（健全度）評価は、数多くの橋梁および損傷項目について力学的観点より検討を行うことが困難なことから、専門技術者の経験による判断により行う方法が主流である。そこで本研究では、各パーツの損傷が独立して発生するものと仮定して、損傷度評価アンケートと同様に $L_{27}3^{13}$ の直行表を利用し 27 ケースの各パーツ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。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。鋼橋の場合について各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計算した結果を表-1 に示す。

(2) 実験計画法及びニューラルネットワークによる危険度評価および考察

実験計画法では各パーツの損傷度の 2 次の項まで考慮することとし、主桁と床版の損傷度が危険度に与える影響度が大きいため交互作用の項も考慮に入れた。そのため、実験計画法では鋼橋のパーツ数が 10 個、交互作用の項が 2 個の 12 個を使用して評価

式を作成していることより、ニューラルネットワークと同様にアンケート結果との誤差が小さく精度よく評価している。

今後 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アルゴリズムが複雑となること、教師データ数が 27 個と少ないことより、パーツの重みが小さい地覆や舗装を補修した場合（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結果が得られる場合が生じた。一方、実験計画法では式(1)及び式(2)で示したごとく、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、適用が容易となり、また、各パーツを補修した場合の感度の計算を正確に行うことができることが明らかとなった。

鋼橋の危険度の推定式

$$f_s = 3.942 + 0.298(A-3) + 0.231(B-3) + 0.119(C-3) + 0.211(D-3) + 0.118(E-3) + 0.055(F-3) + 0.042(G-3) + 0.033(H-3) + 0.057(I-3) + 0.042(J-3) + 0.016\{A-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.006\{B-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.003\{C-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.003\{D-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.007\{E-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.014\{F-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.008\{G-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.011\{H-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.017\{I-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.005\{J-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.087(A-3)(B-3) + 0.021(A-3)\{B-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.029\{A-3\}^2 - \frac{8}{3}\{B-3\} - 0.007\{A-3\}^2 - \frac{8}{3}\{B-3\}^2 - \frac{8}{3} \quad (1)$$

コンクリート橋の危険度の推定式

$$f_c = 3.860 + 0.310(A-3) + 0.228(B-3) + 0.235(D-3) + 0.116(E-3) + 0.036(F-3) + 0.044(G-3) + 0.038(H-3) + 0.051(I-3) + 0.030(J-3) - 0.005\{A-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.009\{B-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.016\{D-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.034\{E-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.001\{F-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.002\{G-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.033\{H-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.040\{I-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.014\{J-3\}^2 - \frac{8}{3} - 0.088(A-3)(B-3) + 0.017(A-3)\{B-3\}^2 - \frac{8}{3} + 0.020\{A-3\}^2 - \frac{8}{3}\{B-3\} - 0.024\{A-3\}^2 - \frac{8}{3}\{B-3\}^2 - \frac{8}{3} \quad (2)$$

ここに、A…主桁の損傷度 B…床版の損傷度 C…二次部材の損傷度
D…橋脚の損傷度 E…支承の損傷度 F…落橋防止システムの損傷度
G…高欄の損傷度 H…地覆の損傷度 I…伸縮装置の損傷度
J…舗装の損傷度

表-1 6 名のアンケート回答者による各パーツの重み

鋼橋	A氏	B氏	C氏	D氏	E氏	F氏
主桁	0.16	0.23	0.25	0.34	0.23	0.29
床版	0.20	0.15	0.25	0.23	0.16	0.18
二次部材	0.10	0.11	0.10	0.05	0.07	0.14
橋脚・橋台・基礎	0.15	0.17	0.25	0.08	0.26	0.14
支承本体	0.13	0.08	0.05	0.11	0.14	0.08
落橋防止システム	0.07	0.06	0.05	0.00	0.00	0.08
高欄	0.06	0.07	0.02	0.03	0.00	0.02
地覆	0.02	0.05	0.01	0.05	0.00	0.02
伸縮装置	0.06	0.03	0.01	0.08	0.07	0.02
舗装	0.04	0.04	0.01	0.03	0.07	0.02
重みの合計	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99

参考文献

- 1) (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
- 2) 柏村孝義 他：実験計画法による非線形問題の最適化，朝倉書店，平成 10 年
- 3) 萩原一郎 他：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にお開発，機論(A)63 巻 616 号, pp.2510-2517, 1997