

拡張したマハラノビス距離の橋梁総合健全度評価への適用

Application of extended Mahalanobis distance to the evaluation of total bridge integrity based on inspection results

阿曾 克司*・近田 康夫**

Katsushi Aso・Yasuo Chikata

*工修, 株式会社日本海コンサルタント (金沢大学大学院自然科学研究科環境科学専攻)

**工博, 金沢大学教授, 金沢大学大学院自然科学研究科環境科学専攻 (〒920-1192 金沢市角間町)

In order to manage bridge assets, it is necessary to evaluate the bridge integrity quantitatively from the inspection results. In this paper, the multi-dimensional information analytical method (MTS: Mahalanobis-Taguchi system) using Mahalanobis Distance developed in the quality engineering was examined to evaluate applicability for total integrity of bridge. The compound distance (extended Mahalanobis Distance) by MTA(Mahalanobis-Taguchi adjoint) method was derived from normal space to evaluate the rank of bridges with some deterioration as evaluations of bridge integrity. The threshold to the compound distance was decided to categorize the level of deterioration. As a result, it was found that this method was able to evaluate the bridge integrity.

Key Words: Mahalanobis distance, evaluation of total bridge integrity, assets management

キーワード: マハラノビス距離, 橋梁総合健全度評価, アセットマネジメント

1. はじめに

戦後から高度成長期を経て現在に至るまでに大量に構築されてきたインフラ土木構造物施設は,これから更新時期を迎える。厳しい環境下に置かれた施設は,特異な劣化要因により経年劣化を越えるスピードで劣化が進行し,本来の耐用年数を全うできないことが多々ある。一方,我が国の現状は,経済成長の鈍化に加え少子高齢化が進行し,近い将来において社会保障費の増大などが懸念されており,必要となる社会資本整備費の捻出が非常に困難になることが予想される。このため,既存の構造物を予防保全により適切に維持管理しながらできるだけ延命化することが不可欠で,橋梁維持管理システム(Bridge management system, BMS)に代表される研究が早急の課題として活発に行われている。

橋梁維持管理システムを包括する考え方として,アセットマネジメント¹⁾の考え方がある。金融工学から派生したアセットマネジメントは,土木構造物をアセット(資産)として捉え資産運用する考え方である。アセットマネジメントでは,構造物の劣化を予測することにより予防保全としての適時に補修・補強を行い,構造物のライフサイクルコストを最小化することがひとつの目標で,長期的な予算配分をできるだけ平準化することも目標の一つとなっている。現時点では,先進的な地方公共団体において,その導入に関する検討が実務レベルで執

り行われており,一部運用開始したところもある。アセットマネジメントでは,対象とする構造物の劣化予測および補修・補強の優先順位策定等に各構造物の総合健全度評価を用いる必要がある。これは,適切に点検された結果をもとにして点数として算出される指標であり,構造物を構成する各部材に対する検査点検を基に点数評価を行い,その評価を総合して構造物全体の健全度を評価するものである。

橋梁の健全度評価は,これまで専門家による評価を基本とし,計算によって算出する手法として,加重計算法及び減点法²⁾が用いられている。これらの手法は文献³⁾において問題点が指摘されているが,国内外で実用的に使用されている。

本研究の目的は,橋梁の健全度評価に対して多次元情報を解析する際に利用されているマハラノビスの距離を拡張した形で適用し,その実用性の検証を行うことを目的としている。橋梁点検結果は,多くの検査項目から構成されており,多次元情報の集合体と言える。この集合体に対してマハラノビスの距離を利用した単一のものさしを作成すれば,橋梁の健全度評価を実用的に行うことができる。

本手法の最も特徴的なことは,多くの項目を同時に考慮することが可能で,これまで提案されている手法に不可欠な項目毎の重み係数を別途もとめる必要がなく,重み係数を内含した形で評価可能なことである。また,点

検結果以外の項目、例えば、橋長、橋令、構造形式、交通量等を点検結果と同列に扱うことが可能で、その取り扱いを工夫することにより、重要度を加味した補強・補修の優先度として、算出されたマハラノビス距離を利用可能となる。データの蓄積を重ねることにより精度が上がり、専門家でない人によっても簡単に評価可能となることも重要な要素である。また、点検の履歴を考慮すれば、算出されるマハラノビスの距離の変化は健全度の推移を表し、その遷移曲線から劣化予測線の設定ができる可能性がある。現時点では、マハラノビス距離をパターン認識に利用した検討は、品質工学の分野で研究が盛んに行われており、適用例（健康診断 etc.）が少しずつ増加してきている状況である。^{4),5),6)}

2. 橋梁点検評価に関する現状と課題

(1) 橋梁点検評価に関する現状

橋梁の損傷状況は、橋梁の構造形式、交通量及び供用年数、周辺環境等によって千差万別であり、適切な指針に基づき点検を行うことが重要である。我が国では道路橋の橋梁点検業務のために、昭和 63 年に初めて建設省土木研究所が「橋梁点検要領（案）」⁷⁾を発表し、それ以降の橋梁点検は基本的にこの要領に基づいて実施されてきた。この要領は平成 16 年 3 月に改訂⁸⁾され、現在に至っている。また、橋梁に係る各種点検やその記録等の一元管理については、「橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領（案）」（平成 16 年 3 月）⁸⁾に定められている。この基準に基づき統一された点検データの蓄積が着実に進んでいることを考慮すると、各種点検・調査結果や橋梁管理カルテデータをもとに、予防保全を念頭においたライフサイクルコストを最小化するような維持や補修等の計画が立案されるアセットマネジメントの適切な実行が期待されるところである。

点検データの蓄積が進行する一方で、これまでは点検データが橋梁全体の総合健全度評価のために十分活用されていない現状がある。^{3),9),10),11)} 実用的な手法が開発されなかったことが主な理由のひとつであるが、総合健全度評価そのものはアセットマネジメントのように橋梁群全体のマネジメントに資するものであり、これまではその研究が進行中であつたこともあり、総合健全度評価そのものの必要性が低かつたことも理由のひとつと考えられる。橋梁の点検評価の研究開発に関しては、点検業務にエキスパートシステムを導入する方法、ニューラルネットワークを利用する方法、数量化理論、ファジィ数量化理論などの活用について提案されている^{12),13),14),15),16)}。

アセットマネジメントが進化し、より多くの橋梁管理団体に浸透していく段階では、これらの提案されている手段は有効なツールのひとつとして活用されるべきものと思われる。

一方、アセットマネジメントの先進国であるアメリカ

は、日本をはるかにしのぐ国土面積を持ち、管理する構造物の物量も当然ながら多い。加えて合衆国を構成する各州は独立して運営されていることから ASSHTO^{17), 18)} や FHWA¹⁹⁾ の国レベルの橋梁点検要領の他にカリフォルニア州の Caltrans の独自の基準^{20), 21)} やニューヨーク州の基準^{22), 23)} 及びニューヨーク市独自の基準^{24), 25)} などの地域性が反映された形で存在している。橋梁点検評価手法は、ASSHTO^{17), 18)} や FHWA¹⁹⁾ のように橋梁の機能的な評価を含めた総合健全度評価を計算する手法や²⁴⁾、²⁵⁾などに述べられている加重平均法によるニューヨーク市内の橋梁点検評価の手法がある。

(2) 橋梁点検評価に関する課題

橋梁点検評価の今後の課題としては、アセットマネジメントを念頭においた橋梁点検方法と判定方法および橋梁全体の総合健全度評価の手法の開発があげられる。

橋梁点検法及び判定法の課題の具体的なものとしては、①非破壊評価法による定量的な評価手段の導入、②熟練技術者によらない簡易な点検および判定法開発がある。現行の点検要領は目視中心の点検ではあるが、細項目に別れ、全体として点検費用が大きなものになってしまふとの指摘がある。維持管理を適切に運用し継続することがアセットマネジメントとして最も基礎的な重要事項であることから、財政事情を考慮しできるだけ最小限で最大限の効果をj得る努力が必要と考える。

橋梁全体の総合健全度評価はこれまでに加重平均法及び減点法などが提案されている^{3),9),10),11),16)}。これらの手法における重み係数の設定は重要な検討課題であり、長大橋などの橋梁形式による補正や地震環境、自然条件及び交通環境による補正が必要であることから、適切な評価法の確立が必要となっている。

本論文では、これらの方法とは異なり、項目毎の重み係数を別途算出することを行わないで、点検結果の多項目から総合健全度評価を行う手法の提案を試みている。

3. MTシステム

製造業などの分野において、品質確保の目的において様々な管理・評価等に関する手法の開発が行われてきている。その中のひとつとして、品質工学（品質工学会：1993 年設立）でのタグチメソッドがある。これは、実験計画法から発展してきた技術で、調べたい因子の効果を少数サンプルで評価するための統計的な手法であり、平均値の変化の解析を基礎とし、ばらつきや劣化をなくするための予防設計技術として発展してきている²⁶⁾。

本論文において、橋梁健全度評価に適用を試みた手法は、タグチメソッドの手法の一つで、総称して MT システムと呼ばれているものである。これは、調査データから個体を判定するための手法であり、診断、予測、パターン認識、検査における判定などの幅広い用途の可能性

があり、品質工学において鋭意研究が進められている。

ある個体（状態）があるとき、その個体が正常の個体の集団の中心からどの程度ずれているかを判定する方法で、MTシステムでは、どのくらいずれているか判定する尺度（ものさし）として、マハラノビスの距離を用いている。図-1に異常判定概念図を示す。

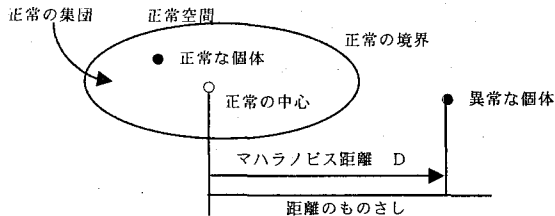


図-1 異常判定概念図

マハラノビスの距離は、インドの数学者であったマハラノビス（1893～1972）により、いくつかの特性間で相関関係をもつ多次元（多変量）空間中の距離を測定する方法として考案された尺度である。マハラノビス自身の提案では、マハラノビス距離を計算するベースとなる相関逆行列を全データより求めたが、MTシステムでは、認識したい多次元の情報を正常（基準）空間とし、異常判定を行うのに正常空間のデータだけから相関係数行列を算出し、それを利用して異常空間の個別データ毎のマハラノビス空間から距離を求め、分離のものさしであるSN比で評価する方法である。基準空間が集団の端にあり、異常になると正常空間からの距離が大きくなって異常との識別がしやすい場合に効果を発揮する。橋梁診断の場合は異常値に大きな意味があり、その内訳（原因とその構成要素）を詳しく検討すべきであるが、アセットマネジメントを運用するにあたっての、健全度評価のランク付けを簡易に行う意味において、本手法は意義があるものと考えられる。現時点では、MTシステムは、MT法（Mahalanobis-Taguchi）、MTA法（Mahalanobis-Taguchi adjoint）及びTS法（Taguchi-Schmidt）の3つの手法より構成されている。本論文では、橋梁総合健全度評価に対して、この3つの手法の中からMTA法を選択し、その適用性について検討した。MT法は考慮する項目間に多重共線性等の問題がある場合に解析不能となる。また、橋梁点検結果より作成する正常橋梁群からなる正常空間は目的特性の結果が均質な集まりであることから、項目の標準偏差がゼロになり、同様にMT法では解析不能となる可能性が高い。MTA法であれば、このような場合でも解析可能である。また、TS法は、正常な集合体が母集団の中央付近に存在する場合の解析に適しており、今回の橋梁の点検結果のように正常空間が集団の端にある場合には適していない。

(1) MTA法²⁷⁾

MTA法は、MT法の派生法であることから、まずMT法

について概説する。MT法でのマハラノビスの距離は次式で定義される。

$$D^2 = \frac{1}{k} \sum_{ij} a_{ij} \times \left(\frac{X_i - m_i}{\sigma_i} \right) \times \left(\frac{X_j - m_j}{\sigma_j} \right) \quad (1)$$

ここに、
 D : マハラノビス距離
 k : 項目数
 a_{ij} : 相関逆行列 A の ij 成分
 X : データ
 m : 平均値
 σ : 標準偏差

相関行列 R を X_i と X_j の相関係数を r_{ij} として、それを成分とする次の行列を求める。

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

係数 a_{ij} は、相関行列 R の逆行列 A の ij 成分である。 R のランクが k で逆行列が正しく求められるときは、相関行列の逆行列 A を求める。

$$A = R^{-1} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kk} \end{pmatrix} \quad (3)$$

MT法のマハラノビス距離算出時における問題点は、項目間に以下のような多重共線性(multi-co linearity)があるときに、相関行列の逆行列の成分値の精度が悪くなり、解けなくなることである。

- ・ 任意の2項目間の相関（単相関）が ± 1 に近いとき
- ・ 複数の項目間の相関（重相関）が ± 1 に近いとき
- ・ その他（対象数 $n <$ 項目数 k ）

また、相関行列 R は、標準偏差 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$ の中にゼロになる項目がある場合や逆行列 A の相関行列のランクが k でない場合は計算できない。マハラノビス自身の提案方法は、基準空間でなく全空間にワンパターンの距離を作成するため、全空間の平均、標準偏差、相関行列で距離を定義することから、そのまま計算できる場合が多かったが、基準空間は項目ではなく、目的特性の結果が均質な集まりであることから、基準空間では項目の標準偏差がゼロになり、ランクが k 未満になることが多い。このような問題点を解決する方法として、MTA法が開発されている。

基準空間で標準偏差がゼロでない項目、 $X_1, X_2, \dots, X_k$ から複合項目としての距離 D を次のようにして求める。MT法と異なって、相関行列ではなく、つぎの分散共分散行列 V から始める。

$$V = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1k} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{k1} & V_{k2} & \cdots & V_{kk} \end{pmatrix} \quad (4)$$

これから、次の余因子行列 A を求める。

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1k} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{k1} & A_{k2} & \cdots & A_{kk} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここに、 A_{ij} は分散共分散行列の V_{ij} の余因子、すなわち分散共分散行列で i 行、 j 列を除いた残りの余因子の行列式の値である。行列 A の行列式の値がゼロでも、上記の余因子行列は求めることができる。

基準空間内の各メンバーに対しての距離（複合距離と呼ぶ）は、その 2 乗を D^2 として次式で求める。

$$D^2 = \frac{1}{k} \sum_j A_{ij} \times (X_i - m_i) \times (X_j - m_j) \quad (6)$$

また、基準空間に属さないメンバーについても上式を利用し D^2 を算出する。基準空間外のデータは、基準空間の平均、標準偏差、分散行列には用いていないので、上式はパターン差を含んだ距離ということになる。

以上が、MTA 法による距離の算出方法で、MT システムではこの距離をマハラノビスの距離とは区別し、複合距離と呼んでいる。

(2) SN 比

設定した距離のものさしの測定精度の良し悪しの程度は、次の SN 比であらわすことができる。

$$\text{SN比} = \frac{\text{有効な成分 (Signal)}}{\text{有害な成分 (Noise)}} = \frac{\text{比例関係で説明できる成分}}{\text{比例関係からのばらつき}}$$

有効な成分が多い、すなわち SN 比が大きいほど、測定精度が優れていることになる。SN 比の算出方法について以下に述べる。

複合距離 D について、データの真値（橋梁の健全度評価） $M_1, M_2, \dots, M_l$ と複合距離 $D_1, D_2, \dots, D_l$ 間に比例式

$$D = \beta_0 M \quad (7)$$

を考える。 β_0 の推定は

$$\hat{\beta}_0 = \frac{M_1 D_1 + M_2 D_2 + \cdots + M_l D_l}{M_1^2 + M_2^2 + \cdots + M_l^2} \quad (8)$$

となる。また SN 比 η_0 は、

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \cdots + M_l^2 \quad (9)$$

とおけば次式で与えられる。 $\eta_0 < 0$ なら $\eta_0 = 0$ とする。

$$\eta_0 = \frac{\frac{1}{r}(S_{\beta 0} - V_e)}{V_e} \quad (10)$$

ここに

$$S_{\beta 0} = \frac{(M_1 D_1 + M_2 D_2 + \cdots + M_l D_l)^2}{r} \quad (11)$$

$$V_e = \frac{1}{l-1} (D_1^2 + D_2^2 + \cdots + D_l^2 - S_{\beta 0}) \quad (12)$$

したがって、橋梁健全度 $M_1, M_2, \dots, M_k$ の真値の推定値は、基準空間で標準偏差ゼロの項目については、それぞれの比例定数 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_g$ を用いて

$$\hat{M}_i = \frac{X_{ij}}{\beta_j} \quad (i=1, 2, \dots, l; j=1, 2, \dots, g) \quad (13)$$

また、複合項目では、

$$\hat{M}_i = \frac{D_i}{\beta_0} \quad (i=1, 2, \dots, l) \quad (14)$$

となる。式(13)と式(14)を SN 比 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_g$ と η_0 で重みをつけて、真値 M_i の総合推定を次の式で求める。

$$(\hat{M}_i)^2 = \frac{\eta_1 \left(\frac{X_{1i}}{\beta_1} \right)^2 + \eta_2 \left(\frac{X_{2i}}{\beta_2} \right)^2 + \cdots + \eta_0 \left(\frac{D_i}{\beta_0} \right)^2}{\eta_1 + \eta_2 + \cdots + \eta_0} \quad (15)$$

このようにして、上式の平方根を求め $M_1, M_2, \dots, M_l$ の総合推定をしたら、最終的評価である真値と推定値に関する比例定数 β と SN 比 η を求める。

$$\beta = \frac{M_1 \hat{M}_1 + M_2 \hat{M}_2 + \dots + M_l \hat{M}_l}{M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_l^2} \quad (16)$$

$$S_\beta = \frac{(M_1 \hat{M}_1 + M_2 \hat{M}_2 + \dots + M_l \hat{M}_l)^2}{r} \quad (17)$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{r}(S_\beta - V_c)}{V_c} \quad (18)$$

式(13)および式(15)に現れる $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_g$ および $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_g$ について記述する。

項目の中に基準空間では、標準偏差ゼロのものが g 個あるとし、それを $Y_1, Y_2, \dots, Y_g$ とする。また、項目数を $(g+k)$ 個とする。そして、データから基準空間の平均値を引いたデータを改めて基準空間で $Y_1, Y_2, \dots, Y_g; X_1, X_2, \dots, X_k$ とする。基準空間の平均値を異常空間のデータからも引いておく。異常データの l 個についての項目を、 $Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_g; X'_1, X'_2, \dots, X'_k$ とする。

データの真値を $M_1, M_2, \dots, M_l$ として、項目 $Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_g$ の β と SN 比 η を求める必要があるが、ここでは例として、 Y'_1 の場合のみを示す。データの Y'_1 の l 個の値を $Y'_{11}, Y'_{12}, \dots, Y'_{1l}$ として、

$$\beta_1 = \frac{M_1 Y'_{11} + M_2 Y'_{12} + \dots + M_l Y'_{1l}}{r} \quad (19)$$

$$\eta_1 = \frac{\frac{1}{r}(S_{\beta_1} - V_N)}{V_N} \quad (20)$$

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_l^2 \quad (21)$$

ここに

$$S_{\beta_1} = \frac{(M_1 Y'_{11} + M_2 Y'_{12} + \dots + M_l Y'_{1l})^2}{r} \quad (22)$$

$$V_N = \frac{1}{l-1} [(Y'_{11})^2 + (Y'_{12})^2 + \dots + (Y'_{1l})^2 - S_{\beta_1}] \quad (23)$$

このような計算を、 $Y'_2, \dots, Y'_g$ にも同様に言い、 $\beta_2, \dots, \beta_g$ 及び $\eta_2, \dots, \eta_g$ を算出する。式(20)が、負の場合は、SN 比 η はゼロとする。

(3) 直交表を用いた項目選択

どのような項目によって正常と異常を判断するのかはマハラノビスの距離の算出結果に影響する。項目の中の判定に役立たない項目や、その項目を使うことでかえって判定精度を低下させてしまうものを除外し、判定に役立つ項目だけを選択する作業は、重回帰分析で、 k 個の説明変数 $X_1, X_2, \dots, X_k$ の中から、目的変数 y を予測あるいは説明するのに意味のあるものを選択する作業と同じであり、項目選択(変数選択)と呼ばれる²⁶⁾。橋梁の総合判定を行う上で、どの点検項目に意味があるかを調べることは、健全度評価の信頼性向上及び合理化のために重要である。さらに、不必要な点検項目を削減することができれば、点検費用の抑制を図ることが可能となる。項目の有用性をチェックするためには、MT システムでは項目を取り上げるか否かを 2 水準系の直交表を用いて、マハラノビス距離の SN 比を比較する(第 1 水準: 項目を取り上げる、第 2 水準: 項目を取り上げない)。

識別力の評価において重要なことは、正常空間作成の対象となった正常のデータを用いるのではなく、異常のデータを用いることである。SN 比の比較には項目の有用性を評価するために図-2 に示す要因効果図を使用する。横軸の上段は、直交表における水準、下段は項目を示す。要因効果が、左上がりである場合は、項目を取り上げる方がよく、左下がりである場合は、項目を取り上げないほうが良いと考えられている。

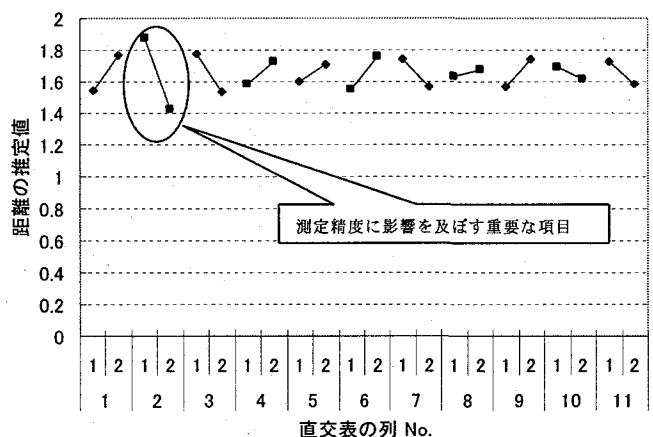


図-2 要因効果図例

4. 橋梁健全度評価への MTA 法の適用

(1) 既存点検橋梁データ

橋梁のデータには I 県が昭和 57 年～63 年に行った、表-1 に示すような 14 の点検項目と総合評価からなる橋梁点検台帳の点検結果を用いた。各点検項目の基準として、○(ほとんど損傷していない。危険性はない。), △(損傷している。危険性はやや高い。), ×(損傷が激しい。危険度が高い。)の 3 段階評価が設定され、各橋梁の健全度評価は、各点検項目の結果に基づいて点検者と同じ診断の専門家が、A(健全であり、目立った損傷は見られない。),

B（軽微な補修を必要とする損傷がある.）, C（早急に補修を必要とする損傷がある.）, D（架替え,あるいは全面的な補修を必要とする.）の4段階で行ったものであるが, 今回の検討に際しては, 各要因の判断基準を○, △, ×の順に1, 2, 3, 健全度評価をA, B, C, Dの順に1(良い), 2, 3, 4(悪い)と数値化した.

表-1 点検結果例

橋梁名	橋長	幅員	橋年令	橋面舗装	地覆・高欄	床版	床組工	主構	支承	伸縮装置	排水装置	塗装	河床洗掘	躯体変動	安定性(構造)	安定性(材質)	耐震性	健全度評価
	m	m	年	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	L1	L2	L3	L4	E1	
A	12	15.6	80	○	○	△	△	△	×	×	○	○	○	△	×	×	×	C
B	28.9	4.7	70	○	×	△	△	△	×	×	×	○	△	△	×	×	×	D
C	6	5.5	69	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○	△	△	△	△	B
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Z	125	12		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	A

この点検台帳には208橋の点検結果が収録されている。健全度の内訳は, 健全度-1が2橋, 健全度-2が56橋, 健全度-3が127橋, 健全度-4が23橋になっている。

項目の取り上げは, 正常空間の特性を定義つける上で重要な作業となる。本研究では, 点検結果項目に表-2に示す項目を追加し, カテゴリーデータとして点検結果の点数同様に下表の点数を与え, 全25項目を取り上げた(表-4参照)。

表-2 追加評価項目の点数化の基準

評価項目	点数化の基準	
	範囲・区分	点数
車両交通量 (台/12h)	10,001以上	3
	3,001~10,000	2
	3,000以下	1
大型車両交通量 (台/12h)	5,001以上	3
	1,001~5,000	2
	1,000以下	1
橋下特性	その他	4
	道路	3
	鉄道	2
	河川	1
下部工形式	壁式	4
	パイルベント式	3
	逆T式	2
	重力式	1
橋種別	鋼製(ST)	3
	RC	2
	PC	1
塩害・ASRの有無	有り	3
	無し	1
設計荷重	T-25	1
	T-20	2
	T-14	3
	それ以外	4

(2) 正常空間(基準空間)の設定

正常(基準)空間をどうつくるかは, 項目の選択同様に重要である。すなわち, 基準空間は正常とされる母集団のばらつきを反映する必要がある。基準となるデータがあまりにも平均的すぎたり, 偏っていたりすると結論を誤る可能性がある。また, 項目数よりデータ数が少ない場合は, 多重共線性の問題が生ずる。

今回の橋梁点検データでは, 健全度評価の最も良い健全度-1の評価は2橋しかなく, 正常空間としては少なすぎることから健全度-2の評価を持つ橋梁群を正常空間に追加する必要がある。健全度-2の橋梁群は56橋あるので, 全てを加えた場合は, 正常空間として58橋のデータがそろふことになる。しかしながら, 点検結果の備考欄に「損傷あり」との記述のあるデータが健全度-2のデータ群には多く見られたため, 反対に異常なしとの記述が明記されている橋梁のみを健全度-1に加えた場合(データ数26)と全部を追加した場合(データ数58)について複合距離の計算を実施し, 算出距離のばらつきとSN比の比較を行いどちらが正常空間として適当かを判別した。

表-3にSN比の算出結果を示す。データ数26の場合はデータが少なくてもSN比が大きく比較的精度が良い。また, 図-3の複合距離の分布図によると, データ数26の方が, ばらつきが小さく基準空間として望ましいと考えられる。

以上より, データ数26の場合が基準空間として適切であると判断し, これを解析で使用する正常空間として設定した。

表-4に正常空間を構成する橋梁群の項目データを示す。

表-3 SN比比較

	データ数26	データ数58
SN比	16.55644	13.07223

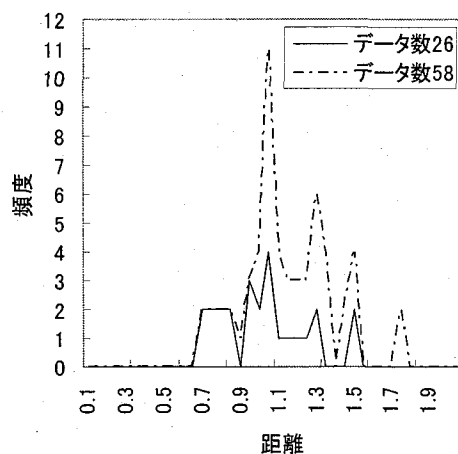


図-3 複合距離の分布(データ数26と58の場合)

表-4 正常空間データ（データ数 26 橋）

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
橋長	m	m	年	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	L1	L2	L3	L4	A1	A2	E1	E2	S1	S2	T1	T2	K3
1	12	65	80	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1
2	57	6	77	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
3	68	78	72	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1
4	105	53	70	2	2	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
5	17	8	64	2	2	1	1	1	1	3	4	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1
6	20.8	57	53	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1
7	10	5	50	2	1	1	2	1	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1
8	27.2	6	49	2	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4
9	42.1	6	48	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	2
10	14.1	7	46	1	1	1	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1
11	10.3	32	57	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1
12	14.5	7	47	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2
13	21.7	43	44	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	3	4
14	20	6	43	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1
15	19.6	6	41	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1
16	15	5	39	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1
17	35	6	38	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1
18	26.4	8	36	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2
19	16	65	36	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
20	66.61	12	33	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2
21	39.25	55	48	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2
22	30	55	47	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1
23	30	55	44	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	2
24	20.2	7	40	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	2	1	3	1	1	2	3	2
25	17	55	37	2	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	2
26	17	62	37	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	2

(3) 異常空間（未知空間）の距離の算定

1) 複合距離算出結果

橋梁点検データの内、健全度-2~4のデータを異常空間とし、正常空間からの複合距離を MTA 法により算出した。図-4に示すように、評価-2および3は複合距離にばらつきが見られ、精度としてはあまり良くない結果と言える。表-5に健全度評価毎の平均値を示した。健全度-1は正常空間として、教師データを与えてキャリブレーションしていることから、複合距離が平均値 1.0 に基準化されている。図-5に示す頻度グラフでは、評価-3が評価-2を包絡しており、判別分離が困難なことがわかる。これは、文献 28) によって、同じ点検結果に対して、数量化Ⅱ類を適用し解析した結果と同様な傾向を示している。

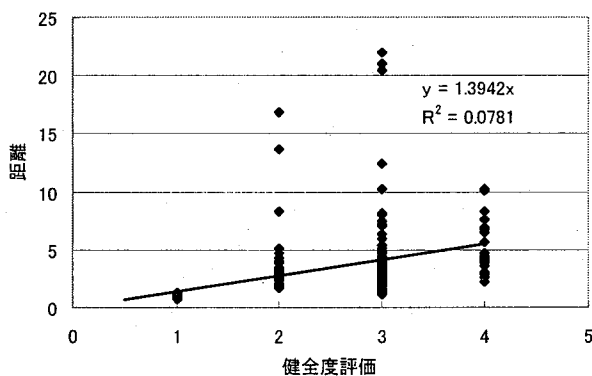


図-4 健全度評価と距離分布

表-5 距離合計と平均値

健全度評価	1	2	3	4	総計
件数	26	32	127	23	208
距離合計	26.00	135.92	517.85	117.50	797.27
距離平均	1.000	4.247	4.078	5.109	3.833

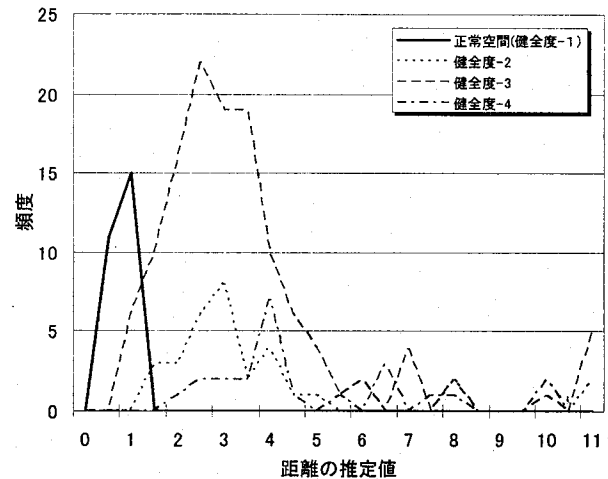


図-5 複合距離と頻度

2) 閾値の設定

健全度を識別するための複合距離に対する閾値は、異常な橋を正常群と誤って判断するときの損失と正常な橋を異常群と誤って判断するときの損失をバランスさせるように決定させるべきである。すなわち、閾値を K としたときの、正常な橋を正常でないと判断する誤りである第1種の過誤のおきる割合による損失と正常でない橋を正常と判断する誤りである第2種の過誤のおきる割合をバランスさせる場合が適当な閾値といえる。ただし、過誤をできるだけ少なくできる閾値が見つかる場合はその値を閾値とする。表-6~7に健全度間の閾値の検討結果を示す。過誤の%を Error で示してある。 ρ は寄与率で $0 \leq \rho \leq 1$ の値をとり、 $\rho=1$ の場合、識別力 100% を示す。分母は周辺度数の積、分子が対角方向の積の差の2乗で、相関係数の2乗にあたる。一方、 η は SN 比を表し、単位は db 表現され下式により算出される。なお、寄与率 ρ と SN 比 η は、第1種の過誤による損失と第2種の過誤による損失が同等である場合の識別力の評価として有効である。

$$\eta = -10 \cdot \log \left(\frac{1-\rho}{\rho} \right) \text{ (db)} \quad (24)$$

健全度-1 及び 2 の閾値として、複合距離 1.20 を採用した場合（表-6）、両者を完全に識別できることがわかる。

表-6 健全度-1 及び 2 の閾値

健全度評価	$D^2 \leq 1.00$	$D^2 > 1.00$	total	Error	ρ	η
1	11	15	26	58%	0.288052	-3.92977
2	0	32	32	0%		
健全度評価	$D^2 \leq 1.20$	$D^2 > 1.20$	total	Error	ρ	η
1	26	0	26	0%	1.00	-
2	0	32	32	0%		

しかし、図-5 に前述したように健全度-3 の橋梁が複合距離 1.20 以下にも存在することから、健全度-1 及び 3 の閾値が別途必要となってしまう。

健全度-2 及び 3 の閾値を 3.20 とすると第 1 種および第 2 種の過誤の損失をおおよそ同じ程度にすることができ、しかしながら識別力は低く、判別が困難な状況と言える(表-7)

表-7 健全度-2 及び 3 の閾値

健全度評価	$D^2 \leq 2.00$	$D^2 > 2.00$	total	Error	ρ	η
2	3	29	32	91%	0.014833	-18.2228
3	27	100	127	21%		
健全度評価	$D^2 \leq 3.20$	$D^2 > 3.20$	total	Error	ρ	η
2	15	17	32	53%	0.002865	-25.4166
3	68	59	127	54%		

(4) 2 段階適用による距離の算定

MTA 法の 1 段階(1 回)の適用により、健全度-1 及び 2 の識別は複合距離 1.20 を閾値とすれば可能であることがわかった。しかし、それ以外の判別は精度が低いと言える。そのため、評価別の判別力を向上させる試みとして、MTA 法の 2 段階適用を試みた。

健全度-2 の橋梁群を基準空間として設定し直し、異常空間として健全度-3 及び健全度-4 の複合距離の算出を行った。

1) 複合距離算出結果

表-8 に示すように、健全度-2 の距離平均値が 2.0 となり基準化されている。また、健全度-3 及び 4 の平均値が増加していることがわかる。

表-8 距離合計と平均値(2 段階方式)

健全度評価	1	2	3	4	総計
件数	26	32	127	23	208
距離合計	26.00	64.00	581.33	161.27	832.60
距離平均	1.000	2.000	4.577	7.012	4.003

図-6 によると、健全度-2 の距離のばらつきがかなり低減されていることがわかる。

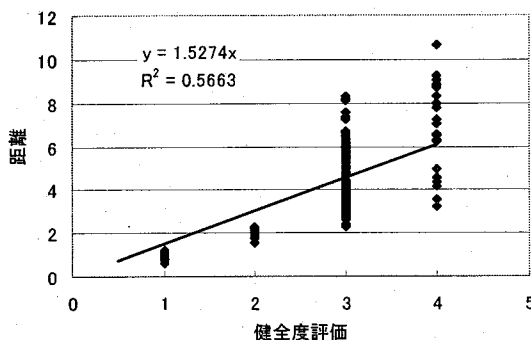


図-6 健全度評価と距離分布(2 段階方式)

図-7 に頻度分布では、健全度-3 は健全度-2 を包絡

することなく、分離されているのがわかる。

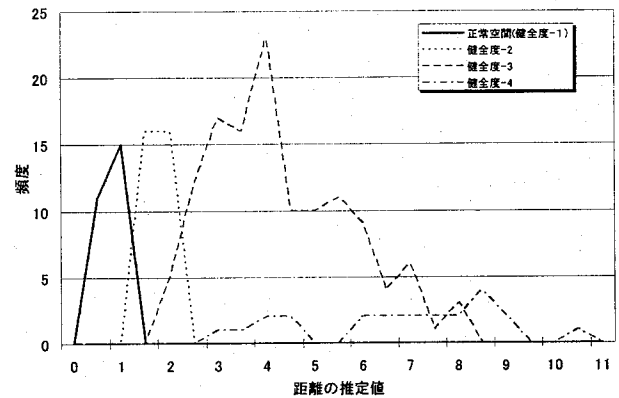


図-7 複合距離と頻度(2 段階方式)

2) 閾値の設定

この結果を基に、閾値の検討を行った。表-9 に示すように閾値を 2.29 とすれば、健全度-2 及び 3 をほぼ識別できる。また、健全度-3 及び 4 に関しては、表-10 に示すように閾値を 5.50 とすれば、損失をほぼバランスさせることが可能である。ただし、3 割近く識別できないデータが残る結果となった。

表-9 健全度-2 及び 3 の閾値

健全度評価	$D^2 \leq 2.29$	$D^2 > 2.29$	total	Error	ρ	η
2	32	0	32	0%	0.962062	14.04123
3	1	126	127	1%		

表-10 健全度-3 及び 4 の閾値

健全度評価	$D^2 \leq 5.50$	$D^2 > 5.50$	total	Error	ρ	η
3	93	34	127	27%	0.128567	-8.31103
4	6	17	23	26%		

(5) 項目の影響度分析

健全度評価を行う上で、項目の有用性の有無を調べるために、直交表による割付け SN 比を算出し、要因効果図の作成を行った。全項目数は 25 であることから、本来は直交表 L32 を割り付ける必要があるが、正常空間のデータ数が 26 とすくなく、一度に解析すると多重共線性の問題から、SN 比の算出が出来ない場合があるので、項目を 2 分割し直交表 L12 を用いて評価を行った。表-11 に L12 の直交表を示す

表-11 L12 直交表

項目NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CASE-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CASE-2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
CASE-3	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
CASE-4	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
CASE-5	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
CASE-6	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
CASE-7	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
CASE-8	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0
CASE-9	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
CASE-10	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
CASE-11	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0
CASE-12	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1

表の中では、第一水準（項目を取り上げる場合）の値を1、第二水準（項目を取り上げない場合）の値を0としている。なお、橋種と荷重項および橋下特性は省略し、項目数を22として検討を行った。

解析結果の要因効果図を図-8及び図-9に示す。

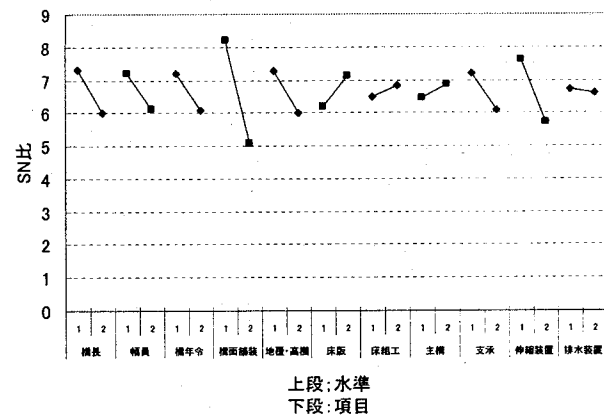


図-8 要因効果図（その1）

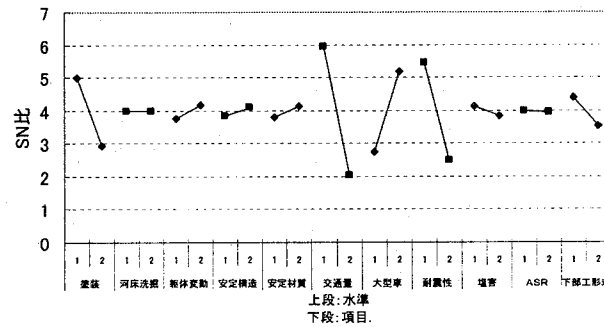


図-9 要因効果図（その2）

要因効果図より、以下の結果が判明した。

- ① 橋面舗装、伸縮装置、塗装、交通量、耐震性は左上がりの傾向を示し、SN比を上げる要因効果が大きく、複合距離の算出に影響を及ぼす重要な項目であることがわかる。逆に、大型車の項目が左下がり、SN比を下げる効果が大きいことがわかった。
- ② 河床洗掘、躯体変動、安定構造（構造、材質）塩害、ASR等は顕著な要因効果は見られなかった。

上記②の項目は、実際の橋梁の健全度評価への影響力が大きく、補修・補強に直結する項目である。しかしながら、今回の検討対象とした解析データには、これらの項目に対して問題となる結果が少なかった（ばらつきがない）ことが影響していると考えられる。したがって、今回の結果を持って、これらの影響の少ない項目の取捨選択は困難である。要因効果による項目選択は、より多くの十分なデータがそろった段階で行うべきものであることがわかった。逆に現時点では、①の項目が健全度を

規定しているものと考えられる。

要因効果の悪い大型車の項目についてのみ削減の効果を確認した。また、交通量と大型車の項目間には、相関係数 0.3 程度の相関が見られたことから、大型車両混入率による項目により、交通量および大型車の項目を置き換え解析した結果を付記する。表-12のSN比の変化によると、大型車の項目のみを削減することによりSN比は減少し、識別力は減少する。逆に交通量および大型車の項目を削減し、代わりに大型車混入率を導入した場合は、SN比が増加し識別力が上がる。このことから、相関の高い項目は削減し、両方を表現する別の指標を導入する方が、識別力が上昇することがわかる。

表-12 SN比の変化

元データ	大型車項目削減	大型車混入率の導入
16.55644	16.37073	16.83341

(6) 重要度を考慮した優先度の設定

アセットマネジメントでは、橋梁の補修・補強の優先順位（優先度指標 P: priority）は、一般的に BHI (bridge health index) および BPI (bridge priority index) により算出される両方の点数から優先順位が決定される。BPI は路線の重要度、交通量に着目して緊急輸送道路などの具体的な内容に対して重みを設定し、加重平均等により算定する。

本論文では、重要度を点検結果と同様な項目の一つとして表-13に示すように点数化したものをMTA法に導入し、算出される距離にこの重要度評価が反映されるかどうか検証した。適切に評価できれば複合距離の算出結果がそのまま、優先順位となる。重要度を表す指標として路線種別や交通量が考えられるが、今回の重要度指数としては、交通量はすでに項目として採用しているため、路線種別による効果を考慮し、評価点数を与えた。

表-13 重要度点数

重要度指標	具体的な項目		点数
路線	緊急輸送 道路	一次	10
		二次	8
		三次	6
	跨線橋・跨道橋		4
	緊急輸送道路以外の 国道・主要道		2
	緊急輸送道路以外の県道		1

解析対象としては、健全度-4の橋梁群23橋を選択し、行った。表-14に解析結果を重要度を考慮しない場合および重要度を考慮した場合について、対比する形で示し

た。左側は重要度を考慮しない場合で複合距離の昇順で並び替えた結果、右側は重要度を考慮した場合の解析結果を昇順で示した。

表-14 重要度を項目として考慮した場合の順位(右側)

重要度を考慮しない場合				重要度を考慮した場合			
橋梁番号	種別	複合距離	重要度	橋梁番号	種別	複合距離	重要度
20	主要	2.254135	2	3	一般	0.979415	1
14	主要	2.558049	2	6	主要	1.739625	2
19	国道	2.94759	8	14	主要	2.20936	2
3	一般	3.014113	1	20	主要	2.289318	2
18	一般	3.033184	1	10	一般	2.499883	1
8	国道	3.641165	8	11	国道	2.683259	6
6	主要	3.803809	2	9	国道	2.956716	8
10	一般	4.056977	1	5	主要	3.088273	2
9	国道	4.089077	8	18	一般	3.371975	1
2	一般	4.110364	1	8	国道	3.613145	8
11	国道	4.244376	6	19	国道	3.715774	8
16	主要	4.317678	2	22	国道	4.141842	8
17	一般	4.402936	1	17	一般	4.423029	1
5	主要	4.43102	2	1	主要	4.516402	2
22	国道	4.697584	8	7	国道	4.567972	8
7	国道	5.597376	8	2	一般	4.638419	1
4	一般	6.511379	1	4	一般	5.121108	1
15	一般	6.719503	1	15	一般	5.192317	1
1	主要	6.920999	2	16	主要	5.240462	2
12	国道	7.545969	8	12	国道	5.858158	8
13	国道	8.256688	8	13	国道	5.877445	8
23	一般	10.10976	1	21	一般	6.395193	1
21	一般	10.2364	1	23	一般	6.474405	1

重要度を考慮することにより、複合距離に変化が見られるが、必ずしも重要度の高いデータの複合距離が大きくなる傾向ではなく、重要度が直接的に評価されているとは言えない結果となった。この結果から、採用した手法が重要度を含んだ基準空間のあり方で距離のものが変化し、重要度が薄く評価され直接的に反映されていない結果であることがわかる。次に1例として、複合距離に重要度点数を直接掛合わせた場合を表-15に示す。

表-15 重要度を直接的に考慮した場合の順位(右側)

橋梁番号	種別	複合距離	重要度	橋梁番号	種別	複合距離	重要度
20	主要	2.254135	2	3	一般	3.014113	1
14	主要	2.558049	2	18	一般	3.033184	1
19	国道	2.94759	8	10	一般	4.056977	1
3	一般	3.014113	1	2	一般	4.110364	1
18	一般	3.033184	1	17	一般	4.402936	1
8	国道	3.641165	8	20	主要	4.508269	2
6	主要	3.803809	2	14	主要	5.116099	2
10	一般	4.056977	1	4	一般	6.511379	1
9	国道	4.089077	8	15	一般	6.719503	1
2	一般	4.110364	1	6	主要	7.607618	2
11	国道	4.244376	6	16	主要	8.635357	2
16	主要	4.317678	2	5	主要	8.862041	2
17	一般	4.402936	1	23	一般	10.10976	1
5	主要	4.43102	2	21	一般	10.2364	1
22	国道	4.697584	8	1	主要	13.842	2
7	国道	5.597376	8	19	国道	23.58072	8
4	一般	6.511379	1	11	国道	25.46626	6
15	一般	6.719503	1	8	国道	29.12932	8
1	主要	6.920999	2	9	国道	32.71262	8
12	国道	7.545969	8	22	国道	37.58067	8
13	国道	8.256688	8	7	国道	44.77901	8
23	一般	10.10976	1	12	国道	60.36775	8
21	一般	10.2364	1	13	国道	66.0535	8

このような方法を用いれば、重要度を直接的に考慮することが可能で、算出された距離は優先順位と考えることができる。

以上より、重要度を直接的に評価するには、複合距離を算出する空間内で項目として考慮するのではなく、別途空間外部において考慮する必要があることがわかった。

(7) 劣化曲線の想定

項目において点検の履歴を考慮して本手法を適用すれば、複合距離は履歴を含む距離として算出される。劣化を示す点検履歴があれば、異常を示す橋梁群は、正常空間からの距離が大きくなるものと考えられ、これを利用すると距離の経年変化を表現することができ、さらには橋梁の劣化曲線の想定が可能である。塩害やASRなどの特別な劣化要因が支配的な場合は、本手法では多項目の影響により特別に考慮すべき項目の影響が薄まるので、このような場合は項目点数の与え方など、別途考慮する必要がある。

本論文では、表-16に示すように文献29)を参照に部材の耐用年数を設定し、経年劣化を表すデータを作成して解析を行った。履歴を考慮する項目としては、点検項目の主項目である橋面舗装、地覆・高欄、床版、床組工、主構、支承、伸縮装置、排水装置に関してデータ作成を行った。

表-16 設定耐用年数

項目	耐用年数	項目	耐用年数
橋面舗装	15年	主構	30年
地覆・高欄	50年	支承	30年
床版	30年	伸縮装置	15年
床組工	30年	排水装置	15年

また、表-17に作成した経年劣化データの一部を示す。

表-17 項目の経年劣化データ

項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
橋梁名	橋梁A	橋梁B	橋梁C	橋梁D	橋梁E	橋梁F	橋梁G	橋梁H	橋梁I	橋梁J	橋梁K	橋梁L	橋梁M	橋梁N	橋梁O	橋梁P	橋梁Q	橋梁R	橋梁S	橋梁T	橋梁U	橋梁V	橋梁W	橋梁X	橋梁Y
経過年数	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
橋梁A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁E	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁G	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁I	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁J	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁L	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁O	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁Q	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁R	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁T	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁U	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁V	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁W	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁X	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
橋梁Y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

図-10 に解析結果である複合距離の経年変化を示す。項目の経年劣化による評価変化の影響が、複合距離算出結果に反映されていることがわかる。適用性については、今後多くのデータによる検証が必要であるが、点検結果から経年劣化を複合距離により直接、定量的に表現できることがわかった。

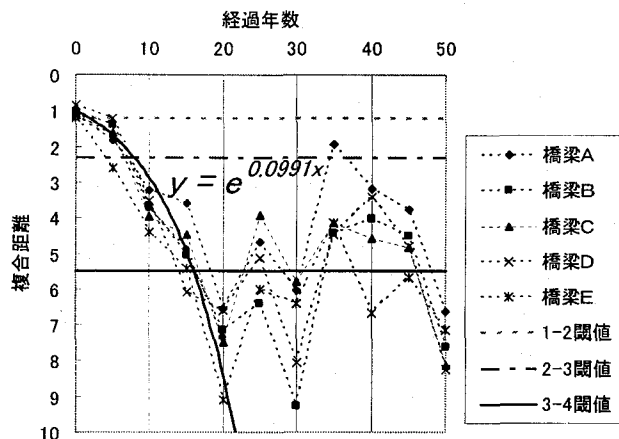


図-10 複合距離による劣化曲線の想定例

5. 結論

本論文では橋梁維持管理のための総合健全度評価に対して、解析方法に MTA 法の適用性に関する検討を行った。得られた結論を要約して以下に示す。

- (1) 既存の橋梁データに対して、正常橋梁群で正常空間を作成し、MTA 法を適用することにより異常橋梁毎の正常空間からの距離（複合距離）を算出した。算出された距離は、正常空間からの離れ具合を示すことから、橋梁の健全度評価を示すものとなる。また、橋梁点検項目以外の評価項目（橋長、橋種、橋年齢等）を考慮することができることを示した。
- (2) 既存の橋梁健全度評価と比較することにより、正常橋梁群と異常橋梁群を識別するための閾値を複合距離に対して設定し、正常と異常を識別する、すなわち健全度-1 及び 2 を明確に区別することができた。また、MTA 法を 2 段階に適用することにより、健全度-2 及び 3 を区別する閾値の設定を行うことができた。ただし、2 段階に適用した場合の算出された距離は意味が相違するため、統一的な距離として利用する場合には補正が必要であり、今後の課題である。
- (3) 直交表を用いた実験計画法を適用することにより、要因効果図を作成し、複合距離算出に対する影響度効果について検討した。その結果、複合距離算出において適用した点検データにおいては、橋面舗装、

伸縮装置、塗装、交通量、耐震性が健全度評価への影響度が高いことがわかった。反対に河床洗掘、躯体変動、安定構造（構造、材質）、塩害、ASR などは要因効果が少ないことがわかった。これらの項目は橋梁の健全度に大きく影響する重要な要素であるが、今回採用した点検結果データにはこれらの項目により健全度評価が悪くなっている結果が少なく、要因としての効果が少なかったものと考えられる。

- (4) 橋梁の重要度（例えば、緊急輸送道路は重要度が高い。）を加味して、補修・補強の優先度を算出することが、アセットマネジメントにおいては必要となる。今回採用した MTA 法において、重要度を項目のひとつとして評価した場合は、複合距離へ直接的に反映することが難しいことがわかった。したがって、重要度を評価する場合は、空間の外部で評価する方が望ましい結果となった。
- (5) 定期点検などの点検履歴がデータとしてあれば、MTA 法により、健全度の評価の経年変化を複合距離の変化として表現可能で、得られた結果から劣化曲線の設定が可能であることを示した。

適用した MTA 法は、多くの項目を同列に扱えること、閾値を設定すれば比較的簡単に橋梁の健全度評価が可能であることおよび将来の劣化を予測することが可能になることが特徴と言える。今回の解析結果から、適用した既存の健全度評価が健全度-2 及び健全度-3 の判別が困難な場合があり、既存データ自体の問題点も示唆される。そのため、本手法の適用性に関しては、適切な判断が行われている点検結果を基に検証する、あるいは事前にデータの整合性を検証する手段の確立の必要がある。正常空間のデータ数が多いほど、本手法の精度が向上するものと考えられるので、今後はデータの収集を行い、適用性について更に調査研究を進めていく必要がある。また、今回の橋梁点検データは地方の地域性が含まれているものと考えられるので、他の地方との比較も必要と考える。

参考文献

- 1) 特集/社会資本へのアセットマネジメント導入に向けて土木学会誌, Vol.89, pp10-47, 2004.8.
- 2) 建設省土木研究所：橋梁マネジメントの開発に関する調査研究報告書, 土木研究所資料, 第 3633 号, 1999.
- 3) 佐藤弘史, 萩原勝也：橋梁マネジメントシステム, 土木技術資料, 38-1, pp.38-43, 1996.
- 4) 鴨下隆志, 田端和人, 岡野晴敏, 高橋和仁, 矢野

- 宏：マハラノビスの距離による多次元情報システムの最適化, 品質工学, Vol4, No.3, pp54-68, 1996
- 5) 長谷川良子, 加部勇, 能地和子: MTS を用いた健康診断による信頼性向上, 品質工学, Vol7, No.2, pp67-74, 1999
 - 6) 田口玄一: 多次元情報による統合評価と SN 比-多次元センシングシステムの設計, 品質工学, Vol3, No.1, pp2-7, 1995
 - 7) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領 (案), 土木研究所資料, 第 2651 号, 1988.
 - 8) 国土交通省 国道・防災課: 橋梁定期点検要領 (案), 橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領 (案), 2004.
 - 9) 佐藤弘史: 橋梁マネジメントシステム, 土木学会誌, pp.44-45, Vol.85, No.2, 2000.2.
 - 10) 森弘, 大島俊之, 三上修一, 天野政一, 井上実: コンピュータ・グラフィックスと数量化理論を応用した橋梁の維持点検評価法, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.113-121, 1994.10.
 - 11) 森弘, 大島俊之, 三上修一, 阿部芳昭, 山本洋一: 橋梁の健全度診断における総合評価法の開発, 鋼構造年次論文報告集, Vol.1, 1993.
 - 12) 古田均, 小尻利治, 宮本文穂, 秋山孝正, 大野研, 背野康英: ファジィ理論の土木工学への応用, 森北出版, 1992.
 - 13) 三上市蔵, 田中成典, 北岸秀一, 神戸和仁: 鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける知識の再利用, 構造工学論文集, Vol.38A, 1992.
 - 14) 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.
 - 15) 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, pp.41-49, 1994.8.
 - 16) 土木学会: 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 鋼構造シリーズ 7, 1996.
 - 17) AASHTO: Manual for Condition Evaluation of Bridges, 1994.
 - 18) AASHTO: AASHTO Guide for Commonly Recognized (Co Re) Structural Element, 1997.12.
 - 19) FHWA: Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges, Report No.FHWA-PD-96-001, 1995.
 - 20) Caltrans: Element Level Inspection Manual, Office of Structures Maintenance and Investigations, 1998.6.
 - 21) Caltrans: ABME Structure Maintenance Procedures, Office of Structures Maintenance and Investigations, 1995.1.
 - 22) New York State: Condition Assessment, New York State Bridge Management System.
 - 23) NY-DOT: Bridge Inspection Manual, State of New York, Department of Transportation, 1997
 - 24) Yanev, B.S.: Infrastructure management System applied to bridges, Operation and Maintenance to Large Infrastructure Projects, Vincentsen and Jensen (eds), 1998.
 - 25) Yanev, B.S.: The management of Bridges in New York City, Engineering Structures, Vol.20, No.11, pp1020-1026, 1998.
 - 26) 立林和夫: 入門タグチメソッド, 日科技連.
 - 27) 田口玄一: マハラノビス・タグチシステム目的と手法, 株式会社オーケン.
 - 28) 近田康夫, 橋 譲二, 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, pp.151-159, 1994.
 - 29) 建設省土木研究所: ミニマムメンテナンス橋に関する検討, 土木研究所資料, 第 3506 号, 1997.

(2005 年 9 月 10 日受付)