

氏名	阿曾 克司
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第1006号
学位授与の日付	平成20年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	道路橋アセットマネジメントにおける健全度評価手法に関する研究
論文審査委員(主査)	近田 康夫(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	梶川 康男(自然科学研究科・教授), 高山 純一(自然科学研究科・教授), 前川 幸次(自然科学研究科・教授), 中村 一平(金沢工業大学・教授)

## ABSTRACT

In the Bridge Asset Management, it is necessary to use total integrity of each structure for the targeted deterioration forecast of the structure and the priority level decision etc. of the repair and reinforcement as an index. Up to now, gaining the weight method and demerit mark method are used as the calculation method of total integrity based on the evaluation for inspection results by the specialist. In these methods the setting way of the weight coefficient is important problems, so the correction by the bridge form such as long-span bridges and the correction by an earthquake environment and a natural condition and a traffic environment are necessary, the establishment of an appropriate evaluation method is needed. In this study, the multi-dimensional information analytical method ( MTS : Mahalanobis-Taguchi system) using Mahalanobis Distance developed in the quality engineering, SVM(Support Vector Machine) and LVQ(Learning Vector Quantization) were examined to evaluate applicability for 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 evaluation of bridge integrity. This method can simultaneously consider a lot of items and evaluate total integrity without the weight coefficient of each item separately(containing the weighting factor inside ), so that a man who is not the specialist could easily evaluate the total integrity of bridge based on appropriate inspection results. In addition, the influence at the compound distance by the choice of the items was examined and the applicable of this distance as the substitution of BHI (Bridge Health Index) using weight parameter was examined. As a result, it was found that this method was able to substitute for BHI. The inspection results of each bridge were arranged by the age of the bridge, and the deterioration curve was assumed from each compound distance. Assuming the deterioration curve with a comparatively good correlation became possible when the bridge with a special deterioration factor(Chloride induced damage, ASR and so on) and constructed a deterioration factor was excluded from the assumption of the deterioration curve.

In some researches, neural network is used for finding out the criterion from an actual evaluation of bridge integrity by an expert. In this study, the applicability to the evaluation of bridges integrity is examined by the comparison of SVM and LVQ that is skillful in the pattern recognition. Though it is a result of dependence on the sample data, SVM shows high classification ability with complex parameter setting, and LVQ shows high robustness.

## 学位論文要旨

橋梁アセットマネジメントを構成する要素技術は多岐にわたる。この内の課題のひとつとしてアセットマネジメントを念頭においた橋梁全体の総合健全度評価の手法の開発があげられる。橋梁の健全度評価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、橋梁を構成する各部材の評価を総合して構造物全体の健全度を表現するものである。また、構造物の経年劣化を表現し補修・補強のタイミングを決める LCC 解析のパラメータとして、アセットマネジメントシステムの中での重要な指標の一つとなっている。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が、重み係数の設定が重要な検討課題であった。本研究では、従来の橋梁総合健全度評価手法とは異なり、項目毎の重み係数を別途算出することを行わない総合健全度評価手法の提案を試みた。橋梁点検結果は多数の点検項目からなる多次元情報であるため、多次元情報からのパターン認識として数量化理論や判別式等の多変量解析を始めニューラルネットワークなどの手法について多くの研究において橋梁総合健全度への適用性が研究されてきた。本研究では、これまでに適用されていない手法（マハラノビス距離, SVM, LVQ）を取り上げ、その適用性や拡張性について研究を行った。

### 【マハラノビス距離の適用】

既存の点検結果に対し、マハラノビス距離の橋梁総合健全度評価への適用性について検証を行った。図-1にマハラノビス距離による橋梁健全度判定の概念図を示す。マハラノビス距離は式(1)により算出する。健全度の良い評価の橋梁で正常空間を作成し、MTA(Mahalanobis-Taguchi Adjoint)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。この距離は正常空間からの離れ具合を示すため、橋梁の健全度を表す指標となる。本手法で橋梁点検項目以外の項目（橋長、橋種、橋年齢等）を評価項目として考慮可能なことを示した。また、正常と異常を識別するための閾値の設定を試み、健全度-1及び2を明確に区別可能なことを示したが、それ以外の健全度レベルの識別は精度が劣る。識別力を向上させるためMTA法の2

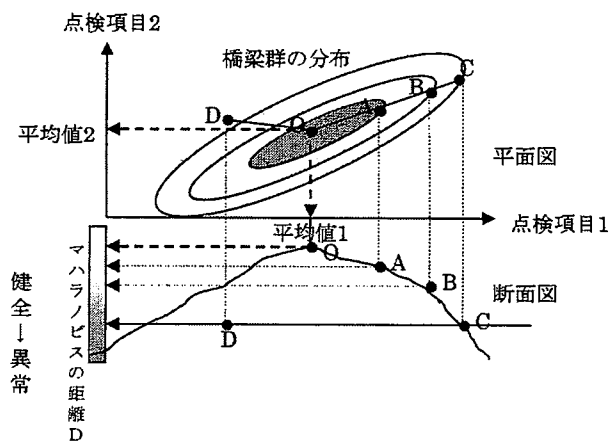


図-1 マハラノビス距離による橋梁健全度判定の概念図

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

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
- $\sigma$  : 標準偏差

段階適用を試みた。項目の影響度分析として、要因効果図による分析と考慮する項目によるマハラノビス距離の変化について検討を行った。直交表による要因効果図を用いた影響度効果の結果、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く、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。項目選択の複合距離への影響は、項目での評価点の開きと健全度-1の正常空間に含まれるデータ特性に依存する。そのため、項目の値の範囲が広範囲におよぶ場合は、カテゴリ化し点数を与えるなどの調整が必要である。項目選択は点検の省力化に繋がる可能性があり重要な検討項目である。そのため、データの蓄積を待って項目選択の分析を再度行う必要がある。また、今回の検討では考慮する項目が少ないほど健全度の識別が困難になった。これはデータ特性によるもので、点検項目以外を考慮した形で専門家による健全度が付与されていることを示している。

既存健全度指標であるBHI（部材毎の重み係数を設定）と比較することにより、その実用性等について整理した。BHIは、優先順位の評価や点検のタイミングを計る指標として利用されることが多く、重みの設定には様々の設定方法がある。マハラノビス距離とBHIとの相関は概ね高く、BHIの代用として使用することが可能と言える。

マハラノビス距離の橋梁総合健全度評価への応用として、マハラノビス距離を用いた優先順位の算定方法や劣化曲線の表現方法について述べた。項目目として重要度を加味して距離を算出すれば、算出された距離は優先度を表現することが可能であることを示した。しかしながら、的確な優先度を得るためには、重要度が高い橋梁が大きな距離となるように正常空間の設定や項目の選択、評価点数の付け方を工夫する必要がある。

点検の履歴がデータとしてあれば、MTA法により経年変化を複合距離の変化として表現した劣化曲線の設定が可能である。健康診断等でマハラノビス距離は将来予測手法として使用されていることから、橋梁の劣化曲線想定の手易な手法として期待される。

#### 【SVMとLVQの適用】

判別式としてその評価の高いSVMとLVQ手法を橋梁総合健全度評価への適用性について検証した。SVM・LVQ共に、全体的には一長一短があり、パターン識別器としての優劣は明確にすることは困難であったが、得られた知見として、① 認識精度は、全体的にSVMがLVQを上回っている。② データ分布に対するロバスト性はSVMが有利。③ 外乱に対するロバスト性はLVQが高い。④ 汎化性の優劣は明確で無い。⑤ LVQの方が学習の信頼性が高い。⑥ 統計解析ツールのR上で解析が可能である。

SVM及びLVQはマハラノビス距離同様に評価において重みを設定する必要がなく、比較的簡単に健全度の判別評価が行える利点がある。一方、両手法とも学習用データによる学習が必要で、再現性は高いが、汎化性に問題が残る結果となった。認識精度を向上させるためには、次元を下げるのが有効で、そのためには項目選択を行う必要があり、マハラノビス距離同様の特徴を有していることになる。ただし、優先度指標や劣化曲線への応用は不可能で、これらの点においてマハラノビス距離は優れている。

#### 【まとめ】

健全度評価のアセットマネジメントへ導入する際の扱う単位は現時点で議論は集約されていない。しかしながら、路線毎の優先度や橋梁特性を評価・表現する橋梁単位の指標が必要で、橋梁全体の状態を表現する総合健全度指標は不可欠と言える。本研究において取り上げた手法は、いずれも根拠が不明確な重みを設定する必要がなく、比較的簡単に総合健全度評価が得られることが最大の利点であるが、既存の点検データによる検証では満足できる結果は得られておらず、検討した手法は現時点で指標として克服すべき課題は多いと言える。一方、今回検討した手法による指標をアセットマネジメントにおける指標群のひとつとして考え、総合的に判断する材料として用いる場合には十分に役立つ指標であると考えられる。中でもマハラノビス距離の指標としての潜在的な可能性は際立っており、精度確保が今後の課題であるものの、多くの情報から一つの尺度を簡易に作り出す機能は魅力的である。本論文で検討したマハラノビス距離の機能は、①健全度評価を点数で表現可能、②優先度評価が可能、③劣化曲線の想定が可能の大きく3つの機能を有している。本手法は健全度評価として適用された実績は無く信頼性に劣るが、データの蓄積とブラッシュアップを続ければ良き指標としての利用が期待できる。分野は相違するが既に医療科学の分野において、健康診断の総合判定にマハラノビス距離は利用されており、健診の項目選択の検討や将来予測が行われている。橋梁も健康診断と同様に捉えることができ、専門家の手を借りずに簡単に判断材料の一つを得る目的においてはマハラノビス距離は的確な手法と言える。当然、特有の劣化要因などを持つ橋梁は専門家によるケアが必要であるが、その他の多くの橋梁はできるだけ維持管理が簡素であることが望ましいことから、評価手法もその取り扱い等が簡易であることが望ましい。今後の課題としては、本論文作成の過程で得られた知見をもとに、手法の適用性を磨き、アセットマネジメントの指標の一つとなるように改良

をすることが必要であると考え。また、これらの指標をアセットマネジメントのシステム内に組み込み、LCC 解析や優先順位の指標として、どのような成果を上げることができるか検証が必要である。

## 学位論文審査結果の要旨

本学位申請論文に対して、審査委員全員で面接と試問を行うとともに、審査委員会にて論文の内容を検討し、審査方針を決定した。平成 20 年 1 月 29 日に開催した公聴会ならびに公聴会後に開催した審査会にて協議の結果以下の通り判定した。

本論文は、近年問題視されている高度成長期に急速に蓄積された社会資本の維持管理問題に着目し、特に既存橋梁のアセットマネジメントにおける橋梁総合健全度評価方法に関して検討したものである。これまでに提案されている橋梁総合健全度評価方法はいずれも橋梁部位単位の健全度評価結果に重み係数を乗じる形式であったが、重み係数の決定において合理性に欠ける点が指摘されていた。本論文は、品質管理工学分野で使われているマハラノビス距離に着目し、重み係数を導入することなく橋梁群を正常群と異常群に分離することで総合健全度評価が可能であることを指摘するとともに、将来的な点検データの蓄積時には劣化曲線の推定にまでも応用できる可能性を示した。さらに、重み係数を使わない橋梁の健全度判別手法として、LVQ、SVM にも着目し、それらの橋梁総合健全度評価への適用の可能性を、再現能力・汎化能力のみならず、統計解析環境 R 上での使用性も含めて検討し、有用なツールと成り得ることを確認した。以上の点より、本研究は工学的に有用な知見を与えていることから、博士(工学)に値するものと判断する。