

橋梁塗装評価への多基準分析法の実用化に関する研究

APPLICABILITY OF MULTICRITERIA ANALYSIS METHOD TO INTEGRITY ASSESSMENT OF BRIDGE PAINTING

古田 均* 梶本勝也** 村井亮介***

By Hitoshi FURUTA, Katsuya KAJIMOTO, and Ryosuke MURAI

As the number of bridges increases and most of them become superannuated, bridge maintenance has raised its importance. For steel bridges, maintenance for painting plays an important role and hence requires a large portion of the total maintenance cost. It is, therefore, important and desirable to establish a rational maintenance program for repainting.

In this paper, an attempt is made to develop a maintenance supporting system which can reduce the cost and load necessary for the maintenance work of painting. Applicability of multicriteria analysis method to integrity assessment of bridge painting is examined and discussed from the standpoint of practical use. Some attempts are made to improve its applicability. Several numerical results indicate that the multicriteria analysis can result in well agreement with the judgment by experts and the concept of "standard data" is useful for the quantitative interpretation of the results obtained.

1. まえがき

近年、橋梁ストック量が増加し、供用年数も長期化するに従い、その維持管理に必要となる費用も年々増加している。中でも塗装の塗替えは、約7～24年間隔で行われ、作業には足場架設を要する、などの理由から橋梁の維持管理費の中でも大きな割合を占めている¹⁾。したがって、塗替え時期を最適化して維持管理費用を低減させることが重要な課題となっている。現在塗装の塗替え時期は目視点検結果を経験者が判定して定めているが、対象となる橋梁の数が非常に多いために十分な管理を行うことが難しく、より合理的な点検法、評価法の開発が望まれている。

そこで本研究では、経験者（エキスパート）によって行われている点検結果の評価を定量化し、コンピューターを利用してエキスパートと同等の評価を行う方法について検討した。エキスパートの評価をコンピューター化する方法としてはエキスパートシステムの適用^{2) - 5)}が各方面で盛んに検討されているが、塗装評価においてはシステム化に十分なルールの獲得に問題がある。さらに塗装評価の特徴として、点検結果は点数として与えられ、予算との関係から各橋梁間の相対的な優劣比較が必要となる、という点が挙げられる。以上の点を考慮し、今回の検討では相対評価により優劣判定を行う多基準分析法⁶⁾をとり上げ、塗装評価への実用性について検討を行った。

* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工博 三菱重工業㈱ 広島研究所 (〒733 広島市西区観音新町4丁目6-22)

*** 三菱重工業㈱ 広島研究所 (〒733 広島市西区観音新町4丁目6-22)

2. 塗装評価への多基準分析法の適用性の検討

まず、塗装評価への多基準分析法の適用性を調べるため、具体的な点検事例に対して多基準分析法による解析を行い、エキスパートの評価と比較検討した。

2.1 検討に用いた点検データ

検討には、日本鋼構造協会指針「鋼橋塗膜調査」⁷⁾に基づいて点検された文献データ^{8), 9)}より10橋分を抜粋して用いた。これらのデータを表1に示す。点数は0～3の4段階評価で、点数の高い方が健全度が高いことを示している。また、専門家の判定は点検を行ったエキスパートによって評価されたものである。なお、文献データ^{8), 9)}では点検結果は構造部分ごとに示されているのに対し、専門家の判定は橋梁全体について行われている。そこで両者の整合性を取るため、構造部分ごとに示されている点検結果を総合的に判断して橋梁全体の点検結果点数を推定し、表1に示す点検結果とした。点検結果点数推定の例を付録に示す。

2.2 多基準分析法による解析

多基準分析法とは、代替案選択のための総合的評価法の1手法である。ここでは、その代表的なものであるNijkampによるConcordance Analysis (協和分析)¹⁰⁾について検討する。この手法は、評価モデルの構成の際に設ける仮定や作業量が少なく、しかも一定の信頼度のある評価が行えるという利点をもつ。また、評価項目ごとの点数(塗装点検では目視点検データに当たる)を基に評価が行える。以下に具体的な評価手順を示す。

まず、評価したい橋梁と点検項目からなるインパクト行列Pを定義する。

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{I1} & \cdots & P_{IJ} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、Iは橋梁の数、Jは評価項目の数を表し、 P_{ij} は橋梁iの評価項目jに関する点検結果を表わす。

次に、各点検項目($j = 1, 2, \dots, J$)の重みを表わすweight w_j を定め、すべての点検項目よりなる重みベクトルWを定める。

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_J] \quad (2)$$

このweight w_j の定め方には、数量化理論第2類による方法、一対比較法および専門家の感覚的な重み付け、などがあるが、今回は後で述べるように専門家の判定を利用して求めている。

このようにして得られたインパクト行列Pと重みベクトルWを用いて、2つの橋梁 i, i' 間の健全度の大小を表す指標として、次式に示すDiscordance Index $d_{ii'}$ とConcordance index $c_{ii'}$ を考える。

$$d_{ii'} = \sum_{j \in D_{ii'}} \left[w_j \cdot \frac{|P_{ij} - P_{i'j}|}{\max_{\substack{1 \leq i \leq I \\ 1 \leq i' \leq I}} |P_{ij} - P_{i'j}|} \right] \quad (3)$$

$$c_{ii'} = \sum_{j \in K_i} \left[w_j \cdot \frac{|P_{ij} - P_{i'j}|}{\max_{\substack{1 \leq i \leq I \\ 1 \leq i' \leq I}} |P_{ij} - P_{i'j}|} \right] \quad (4)$$

ここで、 $D_{ii'}$ は P_{ij} が $P_{i'j}$ より損傷が大きい項目からなる集合を表わし、 K_i は損傷がないという項目からなる集合を表わす。得られた $d_{ii'}$ は橋梁iと i' の劣化度の相対的な程度を表わし、 $c_{ii'}$ は健全度の程度を表わす。最終的な評価は $d_{ii'}$ 、 $c_{ii'}$ から得られる次式に示すDiscordance Dominance Index D_i

と Concordance Dominance Index C_i を用いて行う。

$$D_i = \sum_{i'=1}^I d_{ii'} - \sum_{i'=1}^I d_{i'i} \quad (5)$$

$$C_i = \sum_{i'=1}^I c_{ii'} - \sum_{i'=1}^I c_{i'i} \quad (6)$$

このようにして得られた D_i の値が大きいほど劣化度が大きく、 C_i の値が大きいほど健全度が大きい。ここで、健全度とはその橋梁が期待されている機能および使用性に対する充足度を示す指標であり、劣化度は初期状態からの性能低下度を示す指標である。したがって健全度と劣化度の間には高い相関があるが、数式的な線形関係を持つものではない。(たとえば、劣化度が多少変化しても機能充足度としての健全度はほとんど変化しない場合も考えられる。) なお、上記の2指標以外にも景観度などさらに多くの指標を設定することも可能であるが、かえって対象物の本質を不明確にする懸念があり、図形的にも2軸による表現は容易で人間の直感に訴えるところが大きいと考えられることから、今回の解析では健全度と劣化度の2つの指標を用いることにした。

計算結果を図1に示す。これより、図中の中央付近にあるNo.10を境として右下側(健全度大、劣化度小)に塗膜良好なもの、左上側(健全度小、劣化度大)に要塗替のものが位置している。しかし、さらに詳細に各橋梁の順位を調べてみると、計算結果の順位と専門家の判定で用いられている用語の順位(極めて良好、非常に良好、良好)は必ずしも一致していない。そこで、点検データ出典⁸⁾・⁹⁾を調べてみると、すべての橋梁が同一の点検者により調べられたのではなく、いくつかの点検グループに分かれて分担して点検されていた。また表1の点検結果をみると、No.3とNo.5が同一の点検結果に対して判定用語が異なっていたり、No.1とNo.7では逆転している。以上より、点検グループにより用語の用い方に差のあることが考えられ、今回の検討では判定用語の順位と計算結果の対応については、これ以上の検討は行わなかった。

ここで、今回用いた weight w_j は、表1の点検結果と専門家の判定を利用して計算結果と専門家の判定が良い相関を示すように計算を繰返して求めた。本来ならば何らかの手法を用いて収束計算をさせて求める

表1 塗装評価に用いたデータ及びウエイト

No.	橋梁名	さび	ふくれ	わかれ	はがれ	白亜化	変色	汚れ	専門家の判定
①	新潟大橋 (良好部)	3	3	3	3	3	3	2	良好
②	新潟大橋 (劣化部)	2	2	2	3	2	2	2	全面塗替
③	阿賀野川大橋	2	3	3	3	3	3	2	非常に良好
④	跑馬橋 (劣化部)	1	2	3	3	3	3	2	塗替
⑤	跑馬橋 (良好部)	2	3	3	3	3	3	2	良好
⑥	柿崎川橋	1	2	3	3	2	(2)	3	塗替 (急は要さない)
⑦	新砂橋	3	3	3	2	2	3	2	極めて良好
⑧	夢の島大橋	3	3	3	3	2	3	1	良好
⑨	千石橋	3	3	3	3	3	3	1	極めて良好
⑩	東千石橋	2	3	3	3	2	2	2	良好しかし 塗替えてもよい
評価に用いたウエイト		3.0	2.0	2.0	0.4	0.2	0.2	0.2	

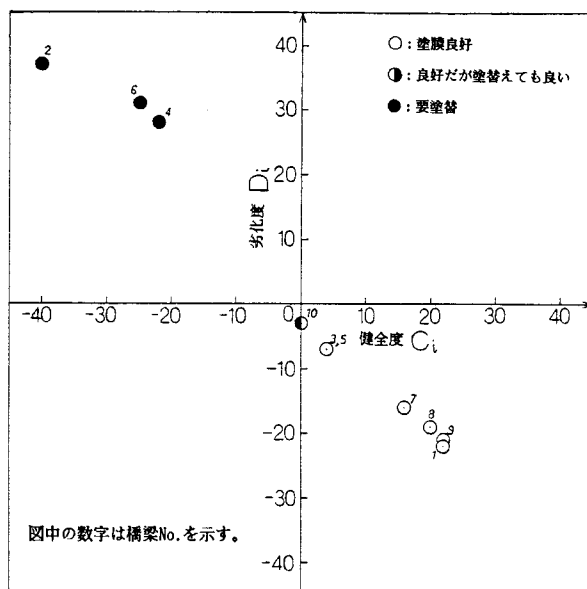


図1 多基準分析法による塗装健全度試験解析結果

べきであるが、今回は専門家の判定が数量化されていないこと、また前述のように判定用語のレベルが統一されていないこと、などから収束計算は行っていない。なお、weight w_j の値が多少変化しても最終の計算結果はあまり変化しないことは確認している。このようにして設定した weight w_j は表 1 中に示すとおりで、さび、ふくれ、われ、に対して高く、白垂化、変退色、汚れ、については低くなっており、常識的にも納得できる値となっている。なお、はがれに対する weight が 0.4 と低いが、出典^{8)・9)}を調べてみると今回「はがれ」として採点されたものは「層間剥離」であり、このため専門家の判定における weight が低くなったものと考えられる。

以上の検討により、①計算結果が専門家の「塗膜良好」、「要塗替」の判定とほぼ対応している、②計算に用いた weight も常識的に見て妥当である、との結果が得られ、塗装評価への多基準分析法の適用性が確認できた。

3. 多基準分析法の実用性向上の検討

前節の検討で、塗装評価への多基準分析法の適用性を確認できた。しかし、あくまでも相対評価であり絶対的な評価ができない、多軸評価した場合の総合健全性が不明確となる、などいくつかの問題点も挙げられる。そこで、本節ではこれらの点に対していくつかの検討を加え、実用性の向上を試みた。

3.1 総合評価軸による一軸化の検討

多基準分析法では、評価軸を増やすことにより評価対象を異なった視点から評価でき、全体としてより質の高い評価が行える。たとえば、2 節で実施した評価では対象を「健全度」と「劣化度」の 2 つの面から評価し、塗装の健全性を総合的に評価しようとしている。しかし反面、評価軸を増やすと全体を総合的に見た場合の優劣が不明確となり、多基準分析法の利点の 1 つである相対的な順位付け能力が低下する。これは、予算との関係で塗替えの優先順位付けが必要な場合や、全体の傾向を概略把握したい場合、塗装劣化の経年変化を追跡したい場合などに不都合となる。そこで、ここでは 2 軸評価の場合について、両軸の評価を総合した評価軸の設定を検討した。

2 軸評価において総合的な評価軸を設定する方法として「原点を中心として回転した軸」を考える。原点を中心として回転した軸においては、その回転角 θ により各軸の評価値は種々の割合で組み入れられるが、その中で各評価対象の優劣を最も明確に示す軸が最適な総合評価軸となる。しかし、その最適軸を求めるにはどのような数値処理を行えば良いかは明確ではない。そこで、今回の検討では、図 1 の結果より各軸の値を 1 対 1 の割合で取り入れる -45° 回転した軸について計算してみた。計算結果は図 2 に示すとおりで、各データとも上下のばらつきは少なく、ほぼ一直線上に右側が塗膜良好のもの、左側に要塗替のものが並んでおり、その順序についても明確な基準は

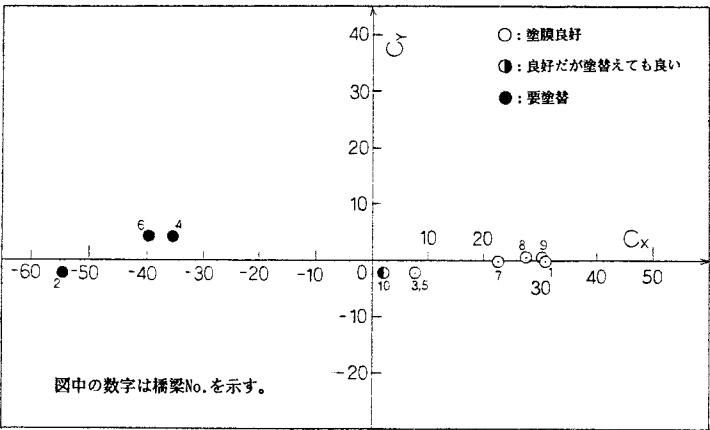


図 2 総合評価軸による一軸化の検討結果（回転角 -45° ）

ないが、回転前の各軸に対する各橋梁の評価点や表1に示す専門家の判定などから見てほぼ妥当と考えられる。このように総合評価軸を設定して一軸化することにより、多軸評価時の優劣比較が容易となり実用性が向上すると考えられるが、最適な評価軸を求める方法については今後さらに検討を加える必要がある。

3.2 標準データの設定による評価結果の絶対性向上の検討

多基準分析法は相対評価のため、同時に計算する他のデータの優劣により評価値が異なり、絶対的な健全度の評価や他の計算結果との比較ができない、などの問題点がある。これを解決するための方法として、既にその健全度が明確となっているデータを評価したいデータに追加して計算し、得られた評価値を比較することによって計算結果に絶対的な健全度評価の尺度を与えることができると考えられる。

そこで、専門家の判定が明確な表1のデータを「標準データ」とし、これを用いて他のデータを評価してみた。新たに計算に用いたデータは、表1に示す標準データと同様の方法で文献^{11)、12)}より作成したもので、その値を表2に示す。(なお、表2のデータについては日本鋼構造協会の「鋼橋塗膜調査」の点数付け法と一部異なる点があったが、これらについてはデータの意味、内容が等しくなるよう注意して日本鋼構造協会の指針に合わせて点数を付け直している。)

表1および表2のデータを併せて計算した結果を図3に示す。☆印が新たに追加した表2のデータであるが、これには表1のデータ同様に専門家の判定がなされている。計算結果と専門家の判定を比較すると、橋梁No.4の場合を除いて、標準データと新たに追加したデータの評価結果は良く一致している。なおNo.4の計算結果がしきい値データNo.10よりわずかに悪い位置にあるのに対して専門家の判定は塗膜良好となっており、両者の評価が合っていないように見える。これはNo.10のデータに対する専門家の評価が「良好、しかし塗替えても良い」(表1)と、真の意味での「塗替え要・否のしきい値」よりも良好なデータを便宜的にしきい値に利用したため、実際よりも厳しい評価となっていることが原因と思われる。このように、標準データを用いることにより、相対評価の結果に絶対的な健全度の尺度を付与できる可能性のあることがわかる。

3.3 正規化処理による評価値の絶対値化の検討

前項で検討した「標準データ」の利用をさらに進め、多基準分析法により得られた評価値を絶対値化する方法について検討した。その処理内容は以下に示すとおりである。

まず、標準データはすべての計算に対して同一のデータを用いることとし、その中に「高健全度の代表点」、「低健全度の代表点」、「塗替え要・否しきい値点」の3点のデータを含めておく。次に、この標準データを評価したいデータに加えて多基準分析を行い、評価値を得る。得られたすべての評価値について「塗替え要・否しきい値データ」の評価値を減じ、しきい値データを原点とした評価値に修正する。この修正された評価値を、さらに先に定めておいた「高健全度の代表点」と「低健全度の代表点」の評価値の差で除して正規化する。以上の処理を行うことにより、すべての評価値はしきい値データを原点とし、常に一定の健全度差に対応した評価値の差で正規化するため、得られた値は安定し、絶対値的评价の意味合いを持つようになる。

表1と表2のデータに対してこの正規化処理を行い、その効果を検討した。表1を標準データとし、No.1を「高健全度の代表点」、No.2を「低健全度の代表点」、No.10を「塗替え要・否しきい値点」とした。表2を評価したいデータ

表2 橋梁塗装評価データ (追加データ)

No.	橋梁名	さび	ふくれ	わがれ	はがれ	白亜化	変退色	汚れ	専門家の判定
[1]	関門橋 (上弦材)	3	3	3	3	2	2	2	良好
[2]	関門橋 (下弦材下面)	2	2	3	3	2	2	2	要補修
[3]	和賀江橋	1	3	3	3	1	2	2	全面究緯 (要補修)
[4]	谷津橋	2	3	3	3	1	2	2	良好
[5]	横沢橋	3	3	3	3	2	2	2	良好

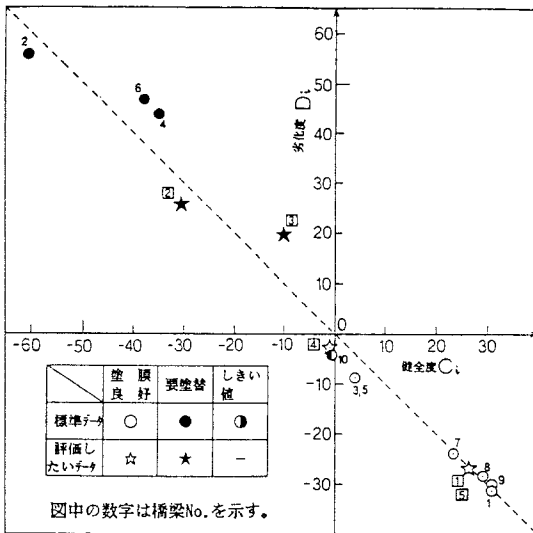


図3 標準データを用いて5個のデータを評価した結果

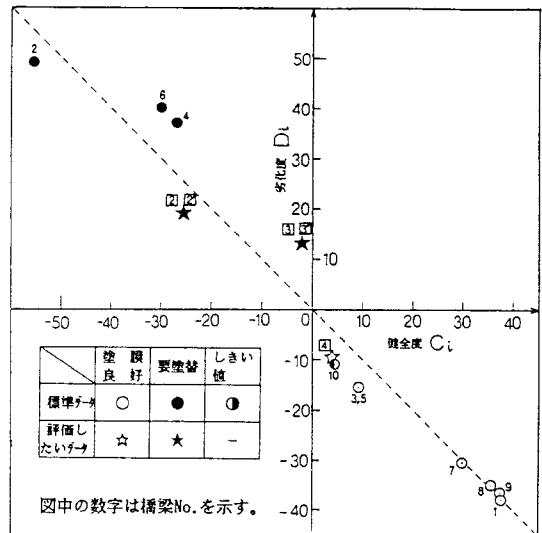


図4 標準データを用いて比較的悪いものを5個評価した結果

として標準データと共に多基準分析した結果は既に示した図3である。また、図4には表2のデータから健全度の高いNo.①とNo.⑤のデータを除き、代わりに健全度の低いNo.②、No.③と同じ値のデータをNo.②'、No.③'として加えて（すなわち相対的に評価したいデータ群の健全度レベルを下げて）同様に多基準分析した結果を示す。これより、多基準分析のみでは評価したいデータ群の健全度レベルが変わると評価値が変化することがわかる。これに対して上述の正規化処理を行った結果を図5(a)、(b)に示す。なお、今回の計算では処理結果の比較を容易にするため、図3、4の多基準分析結果に対して3.1項の一軸化処理を行い、その後上述の正規化処理を行っている。評価したいデータ群の健全度レベルの変化に関係なく同一の点に対してほぼ同様の評価値を与えている。さらに参考のため、表2のデータを1点ずつ個別に多基準分析および正規化処理した結果を図5(c)に示す。この値も先の(a)、(b)とほぼ同様となっており、今回検討した正規化処理が、評価したいデータ群の健全度レベルや個数に関係なく安定した値を与えることがわかる。なお、図5中でNo.④の結果が専門家の判定では塗膜良好であるのに対して、正規化処理した結果では負の値となっているが、これは3.2節にも述べたように今回「塗り替え要・否しきい値点」として用いたNo.10のデータが真のしきい値よりも少し良好であったためと考えられる。

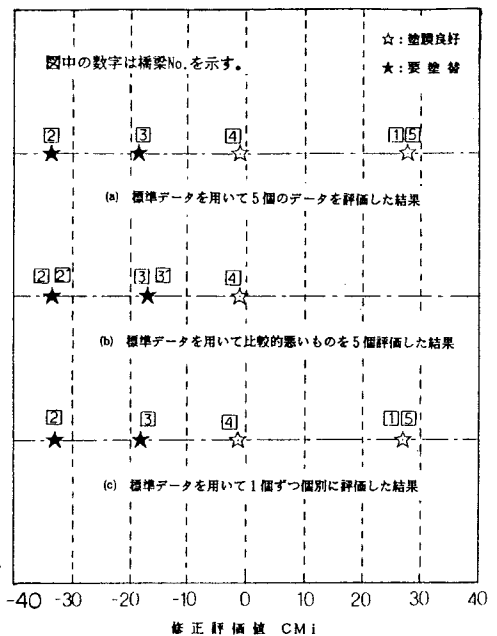


図5 正規化処理による評価値の絶対値化の検討結果

4. あとがき

橋梁の塗装評価への多基準分析法の適用性について検討し、加えて実用性の向上法についてもいくつかの検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 橋梁の塗装評価への多基準分析法の適用性が明らかとなった。
- (2) 総合評価軸による一軸化、正規化处理等により、塗装評価における実用性の向上が期待される。

なお、今回はweight w_j については十分なデータが得られなかったため詳細な検討ができなかったが、今後一対比較法による専門家の知識の獲得やニューラルネットワークなどの応用によるweight設定法に関する検討を行うことが必要である。また、総合評価軸設定法や標準データについても改良を加えて実用性を高めるとともに、エキスパートシステムの適用性ならびに画像処理技術を応用した点検の客観化や足場不用の遠隔検査技術など計測装置の開発についても検討してゆきたい。

付録 調査部位別点検結果による橋梁全体に対する点数の推定（夢の島大橋の例）

夢の島大橋について文献⁹⁾より得られた情報は、付表1に示す調査部位別の点検結果ならびに橋梁全体に対して「防錆性能良好」という専門家の判定のみである。そこで、専門家の判定に対応する橋梁全体の点検結果を付表1より推定し、多基準分析法による解析に用いることとした。推定は各点検項目ごとに平均的な点数を採用することを基本としたが、「汚れ」のように2種類の点数が同数近く存在する場合には局部劣化の影響も考慮して低い方の点数を採用した。推定結果は表1中に示すとおりである。なお、表1、表2に示す他の橋梁についても同様の方法で点数を推定した。

付表1 夢の島大橋 目視点検結果

(a) 新砂側 (b) 新木場側

点検項目			さ	ふ	わ	は	白	変	汚
調査部位			び	くれ	れ	がれ	垂化	退色	れ
箱No.1 げ No.2 た	ウェブ	豊洲側	3	3	3	3	2	2	1
		海側	3	3	3	3	2	3	1
		下フランジ下面	3-2	3	3	3-2	2	3	1
	ウェブ	豊洲側	3	3	3	3	2	2	1
		海側	3	3	3	3	1	3	2
		下フランジ下面	3-2	3	3	3-2	2	3	2
横 げ た			3	3	3	3	2	3	2

点検項目			さ	ふ	わ	は	白	変	汚
調査部位			び	くれ	れ	がれ	垂化	退色	れ
箱No.1 げ No.2 た	ウェブ	豊洲側	3	3	3	3	3	3	2
		海側	3	3	3	3	2	3	2
		下フランジ下面	3	3	3	2	2	3	1
	ウェブ	豊洲側	3	3	3	3	2	3	2
		海側	3	3	3	3	1	3	2
		下フランジ下面	3	3	3	2	2	3	1
横 げ た			3	3	3	3	2	3	2

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会：鋼橋塗装のライフサイクルに関する調査研究，JSSCレポート 1989 No.12
- 2) 古田，Fu, Yao：知識工学－エキスパートシステム－の構造工学への応用，土木学会誌，第70巻，PP. 28-33 (1985)
- 3) 三上，江澤，森澤，田中，朝倉：RC床版の点検・補修に関するエキスパートシステム，第11回電算機利用に関するシンポジウム論文集，PP. 159-166 (1986)
- 4) 中村，松浦，寺野，篠原：水力構造物の寿命予測エキスパートシステムとその適用，土木学会論文集，第374号，PP. 513-521 (1986)
- 5) 西村，藤井，宮本，宮田：橋梁診断のシステム化に関する基礎的研究，土木学会論文集，第378号/V-6 PP. 175-184 (1987)
- 6) Nijkamp, P. : Theory and Application of Environmental Economics, Studies in Regional Science and Urban Economics, Vol.1, North-Holland (1977)
- 7) 日本鋼構造協会指針：鋼橋塗膜調査，JSS-IV-03 (1982)
- 8) 日本鋼構造協会技術委員会：重防食塗膜経年変化調査報告（第2報）JSSC Vol.18 No.197 (1982)
- 9) 日本鋼構造協会技術委員会：重防食塗膜経年変化調査報告（第3報）JSSC Vol.20 No.212 (1984)
- 10) 白石，古田：公共構造物における材料の使用環境および損傷，構造用金属材料の劣化・損傷の実態と非破壊検査技術シンポジウム論文集 (1984)
- 11) 日本鋼構造協会技術委員会：鋼道路橋塗膜劣化調査報告，JSSC Vol.12 No.122 (1976)
- 12) 日本鋼構造協会技術委員会：鋼道路橋塗膜劣化調査報告，閘門橋塗装3年後の塗膜調査報告，JSSC Vol.13 No.134 (1977)

(1989年10月2日受付)