

論文 鉄筋腐食劣化を有するRC橋の評点化手法による性能評価

尾崎 健^{*1}・森川 英典^{*2}

要旨: RC 構造物の劣化機構のうち、塩害あるいは中性化を主要因とする鉄筋腐食に着目し、構造物の点検より得られる情報に基づいた劣化予測を行い、評点により劣化状態を評価する手法について検討を行った。さらに、劣化状態に対応する構造物の耐荷性、使用性、第三者影響度に関する性能について評点による評価を試み、他手法による評価と比較考察した。

キーワード: RC 橋, 塩害, 中性化, 鉄筋腐食, 劣化予測, 評点法, 性能評価

1. はじめに

近年、RC 構造物の劣化が社会問題化し、その維持管理基準の制度化が急がれるとともに、合理的な維持管理法の実用化が望まれている。

簡易的な RC 構造物の性能評価方法として、CEB コンディションレーティング (評点法)¹⁾がある。これは、既設構造物の外観変状から、劣化の程度を定量的に評価する手法である。狩野ら²⁾はさらに外観変状の発生部位が耐力に与える影響の評点への反映方法を改良し、性能評価パラメータの検討を行っている。岸ら³⁾は、CEB 法の基本的な考え方をベースとして、評点に用いる係数の設定をより具体的に行い、耐荷性能の評価を行っている。

本研究では、性能照査型の維持管理を合理的に行うことを目的とし、鉄筋腐食を主要因とする RC 橋上部工の性能低下を評点化手法により比較的簡便に評価できる方法を試みた。本手法では現時点の性能だけではなく、経時的な性能低下を評価する。また実際に、厳しい塩害環境下にある既設橋梁の現時点での評価と今後の予測を行い、別途行った信頼性解析およびアンケート調査による評価と比較した。

2. 劣化予測

2.1 潜伏期について

本研究では塩害の場合、塩化物イオンの拡散

は Fick の第 2 法則に従う拡散方程式により劣化予測を行うものとし、腐食発生限界は塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 とした⁴⁾。また、中性化の場合、中性化の進行は \sqrt{t} 則により予測するものとし、腐食開始の判定は中性化残りが 10mm 、コンクリート中に塩化物が含まれている場合には安全側として中性化残り 25mm と仮定した⁴⁾。

塩害についても中性化についても、評価対象構造物において詳細な点検データが得られる場合、そのデータを反映させ予測の精度を向上させる必要がある。

2.2 進展期について

進展期の期間を決定する要因である鋼材の腐食速度は、既往の研究より一般的な環境 (温度 20°C 程度, 相対湿度 $60\sim 70\%$ 程度) では、 $2 \times 10^{-3}\text{mm/year}$ 程度⁵⁾とされており、これを用いた。

2.3 加速期以降について

加速期および劣化期は、腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間、および腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間である。腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行予測は、研究途上にあるものがほとんどで、まだ確立されていない⁵⁾。ここでは腐食量とひび割れ幅と腐食速度の間に図-1 に示すような関係⁶⁾があるとして、鉄筋の断面減少率に着目した劣化進行予測を行った。ここで示す係数 a や α は既往の研究より近似的に数式化した以下の式により求め

*1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 神戸大学 工学部建設学科助教授 工博 (正会員)

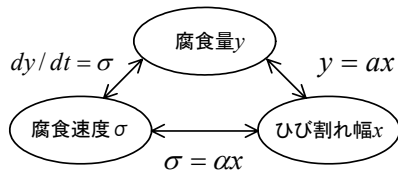


図-1 鉄筋腐食とひび割れ幅の関係

ることができる³⁾。

$$a = 0.141 \exp(1.078d / \phi) \quad (1)$$

$$\alpha = 54.82d^{-1.17} \quad (2)$$

ここに、 d ：かぶり(mm)

ϕ ：鉄筋径(mm)

図-1 に示される関係を用いることによって、ひび割れ幅から鉄筋の腐食量および腐食速度を推定し、腐食減量率を算定できる。またそれらを時間の関数として表すことで、経時的な劣化予測ができる。図-1 の関係から、ひび割れ幅 x を時間の関数として表すと次式のようなになる³⁾。

$$x = C \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{a} t_{crk}\right) \quad (3)$$

ここに、 C ：積分定数、ここでは初期ひび割れ幅(mm)と同義

t_{crk} ：ひび割れ発生時点からの経過年数(year)

腐食速度は、ある一定値以上にはならないと考えられるので、腐食速度の上限値を設定する必要がある。ここでは、著者らが行った鉄筋を塩水に浸漬する促進腐食実験（一般的な環境で5%塩水の1日おき乾湿サイクルを約1年間行った）の結果より得られた平均腐食速度 $2.81\text{mg}/\text{mm}^2/\text{year}$ を上限とした。

3. 性能評価の評点化手法

3.1 評点化手法による性能評価

RC 橋の経時的な性能低下について、各劣化機構の影響により発生する鉄筋腐食量を評点化することにより評価した。ここでは耐荷性能、使用性能、第三者への安全性に関する性能の3性

表-1 各性能の限界状態

性能	限界状態となる腐食減量率
耐荷性能	[部材の断面力]=[耐荷力]となる腐食減量率
使用性能	腐食速度が上限に達する腐食減量率
第三者影響度に関する性能	かぶりコンクリートがはく離する可能性のある腐食減量率10%

能を対象とした。各性能の限界状態について表-1 のように設定した。

3.2 性能評価式

(1) 耐荷性能

耐荷性能は、曲げ耐力への影響を考え、主桁部材を軸方向に3分割した中央部位に着目し評価を行った。評価は健全な状態を100ポイントとし、性能低下が進むにつれてポイントが低下するように設定した。評価式は以下の式となる。

$$R_1 = K_5 [100 - K_1 \{W_{ini} K_{2bc} + (W_{pro} + W_{act}) K_{2ac}\}] \quad (4)$$

ここに、 R_1 ：耐荷性能評価値

K_1 ：劣化機構による影響の大きさを表す係数、最大値は1.0

K_{2bc} ：鉄筋腐食発生前の劣化進行状態を表す係数、最大値は1.0

K_{2ac} ：鉄筋腐食発生後の劣化進行状態を表す係数

K_5 ：断面力の再配分を考慮する係数

W_{ini} , W_{pro} , W_{act} ：それぞれ潜伏期、進展期、加速期以降における評価値の重み付け係数

K_1 は主な劣化機構が塩害や中性化である場合には1.0とした。 K_{2bc} は劣化機構が中性化と塩害の場合に分けて、以下の式により決定した。

(中性化の場合)

$$K_{2bc} = d_c(t) / (d - d_{ck}) \quad (5)$$

ここに、 $d_c(t)$ ：中性化深さ(mm)

d_{ck} ：鉄筋腐食発生の限界中性化残り(mm)

(塩害の場合)

$$K_{2bc} = C(d, t) / C_{lim} \quad (6)$$

ここに、 $C(d, t)$ ：鉄筋位置での塩化物量 (kg/m^3)

C_{lim} ：鉄筋腐食発生の限界塩化物量、一般に $1.2(\text{kg}/\text{m}^3)$

K_{2ac} は以下の式により求めた。

$$K_{2ac} = \Delta w(t) / \Delta w_{lim} \quad (7)$$

ただし、 $\Delta w(t)$ ：腐食減量率

Δw_{lim} ：要求レベルを満足する限界腐食減量率

評価式では、係数 K_5 を導入することにより横

桁の影響を考慮している。横桁は、複数主桁を持つ橋梁において経年劣化が進行してきた場合、劣化進行度の異なる主桁間で断面力を再配分する機能がある。

劣化進行度の違いは、コンクリート中の鋼材近傍への塩化物浸透量の違いに起因し、その原因としては、表面塩化物量や拡散係数の違いということが考えられる。しかし、ここではRC橋の一径間を評価対象としているので、コンクリート部材は同じ施工業者がほぼ同時期に施工していると考え、拡散係数に関しては主桁間での差異は考慮しないこととした。一方、表面塩化物量は海岸からの距離によって、差異が出ることが予想されるので、係数 K_5 については、各主桁の表面塩化物量をパラメータとして設定した。

(2) 使用性能

使用性能では、ひび割れ幅を基準に限界状態の腐食減量率を設定し、評価値 R_2 を求めた。評価式は耐荷性能の場合と同様である。

(3) 第三者影響度に関する性能

第三者影響度に関する性能は、構造物のなかで最も劣化の顕著である部位について評価するものとし、以下の評価式で表す。

$$R_3 = 100 - K_0 K_1 K_4 \{ W_{ini} K_{2bc} + (W_{pro} + W_{act}) K_{2ac} \} \quad (8)$$

ここに、 R_3 ：第三者影響度に関する性能の性能評価値

K_0 ：初期欠陥の減点を表す、初期欠陥が見られない場合に最小値1.0

K_4 ：第三者に対する安全性に関して、対策の緊急性を強調する係数

係数 K_4 は、第三者の安全性に大きな影響を与えたと考えられる浮きやはく落の影響を考慮するために、浮きやはく落と関係の深い腐食量に連動するように設定した。

一般的に第三者影響度を検討する際、スターラップ等のかぶり薄い箇所の鉄筋が対象になるが、本研究で対象とした橋梁における変状としては、主鉄筋方向の腐食ひび割れとそれに伴う、かぶりコンクリートの浮きが支配的であったので、主鉄筋を対象に評価を行った。

(4) 劣化区分による重み付け係数

各性能評価式で用いられている潜伏期、進展期、加速期以降の重み付け係数は、構造物の劣化に与える影響の大きさから、進展期以前よりも加速期以降の重み付けが大きくなるよう設定した。ここでは、進展期以前であれば90ポイントを下回らないと仮定し、進展期以前の重み付け係数の値を設定した。

また、著者らは、本稿のRC橋に対する評点化手法による性能評価と並行して、橋梁管理者に対して、RC橋の劣化に関するアンケートを行い、その情報からの評価も行っている。このアンケートの設問のなかには、耐荷性や使用性の点数付けがあり、そこでもあらかじめ進展期以前であれば90ポイントを下回らないと設定し、両手法による評価の対応をとっている。

3.3 点検による劣化予測の修正と安全係数

点検結果より得られた劣化状況が、事前の予測と異なっている場合には、原因を検討して劣化予測の修正を行う必要がある⁴⁾。コンクリート構造物の維持管理において重要な点検について、その難易度から表-2のようにレベル分けした。レベルの難易度は技術的な面（特殊な測定器具など）と経済的な面（点検のための交通規制による影響など）を考慮した。

点検を行う場合、個々の構造物が有するそれぞれの状況により、全ての点検作業が行えるわけではない。したがって、行うことのできる点検レベルにより段階的に劣化予測を修正できるようにする必要がある。

点検による情報量が多いほうが信頼性の高い劣化予測になるが、一方、点検データが少ない場合には、危険側の評価にならないよう、適切な安全係数を設定しておく必要がある⁵⁾。安全係数については、文献5)に示されている考え方を

表-2 点検レベル

難易度	点検レベル	点検項目
低	I	簡易目視
↓	II	ひび割れ幅測定・打音検査・アンケート
↓	III	超音波試験・赤外線カメラ
↓	IV	自然電位・分極抵抗測定
↓	V	コア試験
高	VI	載荷試験・鉄筋採取

参考に設定する。例えば腐食量減量率 Δw の場合、以下のように設定した。

$$\Delta w = \gamma_b \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c (4y / \phi \Gamma_{Fe}) \quad (9)$$

ここに、 γ_b : 腐食量算出方法の仮定に関する安全係数

γ_p : 平均値から特性値へ変換するための安全係数、一般に 1.2

γ_c : 点検より得られる情報が限定されることに対する安全係数。点検回数を重ねるごとに低く設定

Γ_{Fe} : 鉄筋の単位体積重量(mg/mm³)

劣化予測の修正の流れ(加速期以降)を図-2に示す。点検から得られたひび割れ幅 $x'(t_1)$ が、点検前に予測していたひび割れ幅 x と異なる場合、評価対象橋梁の現状に合わせひび割れ幅を補正する必要がある。その場合は前述の式(3)において係数 a と α の比に対して補正係数 η による補正を行うこととした。

ここで、劣化予測の修正に用いる点検時のひび割れ幅 x とは、評価対象桁部材の劣化変状の最も顕著な1断面において、腐食によるひび割れ幅を測定し、その合計を腐食鉄筋の本数で割った値をいう。鉄筋腐食は図-3に示すような最も外側の鉄筋でのみ発生するものとし、腐食鉄筋とは、この最も外側の鉄筋のことである。

また、腐食速度は電気化学的に分極抵抗から推定することも

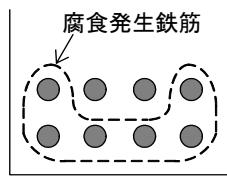


図-3 腐食する鉄筋

可能である。ひび割れ幅による補正係数が設定できたときに、分極抵抗測定より鉄筋腐食速度 σ が得られている場合は、腐食速度とひび割れ幅の関係(図-1の関係)から係数 a を再設定することにより、係数 a が求まり、評価の修正が可能である。さらに鉄筋採取が可能であれば、実際の腐食量から直接係数 a が設定できる。今後、多くの時間を要する、あるいは特殊な機器を用いなければ得られない情報について簡易に得られるよう、簡易な点検による情報と詳細な点検の情報の対応を検討することも重要となる。

4. 実橋梁での劣化予測

本研究では、厳しい塩害環境(海岸から約 50 m)で 44 年間供用されている実橋梁(1 径間の RC 単純 T 桁橋)を対象に点検を行った。この橋梁は 3 主桁で、下流より A・B・C 桁とする。それぞれの桁の劣化状態の概要(外観)を表-3に示す。外観から A 桁・B 桁は加速期後期⁵⁾、C 桁は加速期前期⁵⁾の劣化状態であるといえる。

対象橋梁について、現場での点検が全く行われなかった場合と、実際に点検を行い、得られ

表-3 各桁の劣化状況(外観)

	劣化状態
A桁	・軸方向の腐食ひび割れ範囲が部材の3/4程度 ・最大ひび割れ幅は5mm程度 ・中央部にかぶりのはく落あり(範囲1/4未満)
B桁	・軸方向の腐食ひび割れ範囲が部材の3/4程度 ・最大ひび割れ幅は8mm程度 ・中央部と端部にかぶりのはく落あり(範囲1/4未満)
C桁	・軸方向の腐食ひび割れ範囲が部材の3/4程度 ・最大ひび割れ幅は10mmを超える ・はく落なし

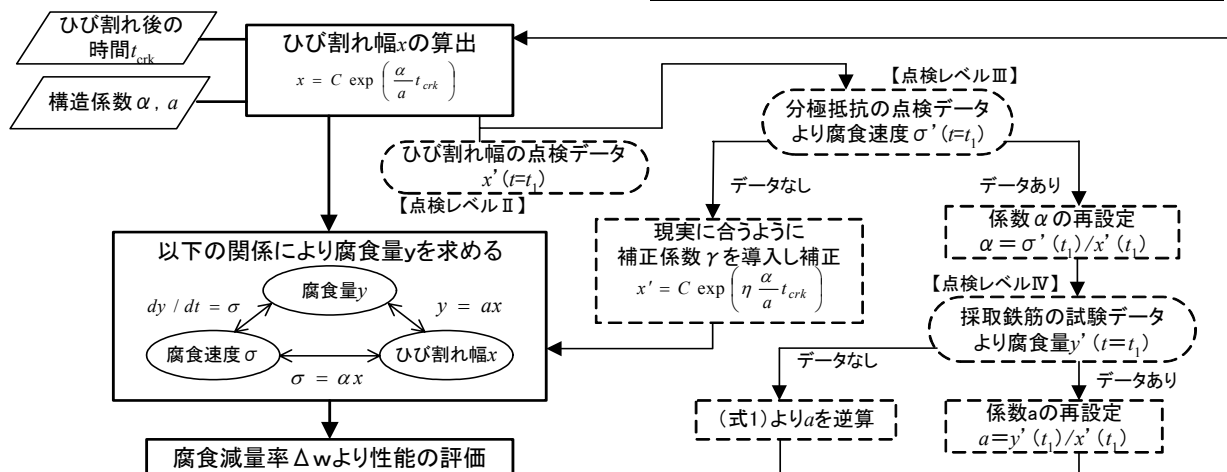


図-2 劣化予測の修正の流れ(加速期以降)

た情報が少ない場合と、より多い場合の3ケース

表-4 検討ケース

	既知のデータ
Case1	供用年数・かぶり・鉄筋径
Case2	Case1+ひび割れ幅
Case3	Case2+拡散係数+表面塩化物量

スに分け、C桁の使用性能を例に、それぞれの評点化による劣化予測を行った。3つの想定ケースはそれぞれ、Case1は点検前、Case2は点検によりひび割れ幅データが得られた場合、Case3はひび割れ幅と塩化物イオンの濃度の深さ方向の分布より拡散係数と表面塩化物量が得られた場合である。それぞれのケースで既知のデータを表-4に示す。

Case1とCase2の表面塩化物イオン濃度は文献4)に示されている値から、下流桁より6.5, 5.5, 4.5kg/m³とした。拡散係数は文献4)より水セメント比(橋梁は海岸近くに架設されており、かつ高強度であったので、W/C=0.45と仮定)を用いた予測式より算出した。

K₄は評価サンプルがまだ少ないことから、設定方法を定めるのは困難であるが、ここでは、次のように設定した。

$$K_4 = \frac{\Delta w_{\max}}{\Delta w_{\max} - \Delta w(t)} \quad (11)$$

ここで、Δw_{max}:性能限界時の腐食減量率
 点検時に、かぶりのはく落によりひび割れ幅が測定できない箇所があった。しかし、はく落箇所が部材の中で最も劣化の顕著な部分であるので、はく落に相当するひび割れ幅(以下、換算ひび割れ幅)を設定することとした。点検による1断面の合計ひび割れ幅の結果を表-5に示す。はく落を有する断面では、はく落の無かったC桁の1断面合計ひび割れ幅以上で設定する必要があり、またはく落してから腐食が進んでいることを考え、最終的に、露出している鉄筋1本をひび割れ幅20mmで換算した。

評価の結果を表-6と図-4に示す。Case3が最も実際の劣化進行に近い結果とするならば、

表-5 各桁の合計ひび割れ幅

	劣化の最も顕著な断面の状態
A桁	露出鉄筋2本
B桁	露出鉄筋1本+ひび割れ幅4.6mm
C桁	ひび割れ幅28.1mm

表-6 各期間のケース別比較

	Case1	Case2	Case3
潜伏期間	5.0	5.0	20.3
進展期間	6.4	6.4	6.4
加速期以降の期間	17.4	37.8	20.1
限界到達年次	28.8	49.2	46.8

(単位:year)

Case2でひび割れ幅の修正を行うことにより、限界到達年次の精度は急激に向上し

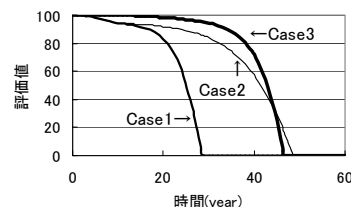


図-4 評価結果の比較

ている。ただし、ひび割れ幅による劣化予測の修正は進展期以前の劣化予測とは関与しないため、表-6におけるCase2のように、加速期以降の期間を実際よりも長く評価してしまい、それに従い腐食速度が実際より小さく評価され、Case3よりもCase2の方が限界到達までの期間が長い結果となっている。

Case2とCase3で潜伏期間が大きく異なっている。これは、表面塩化物量に関しては実際の値と予測値に大差はなかったものの、塩化物イオン濃度の分布から推定した拡散係数が予測値の1/6程度であったことが原因である。これは、拡散係数予測式のパラメータである水セメント比を、実際よりも大きく設定していたためと考えられる。

全桁の耐荷性能・使用性能・第三者影響度に関する性能について、Case3の場合の限界年次をまとめて表-7に示す。

表-7の第三者影響度に関する性能ではB桁が最も遅い時点で限界状態となっている。これは、B桁とC桁で拡散係数と表面塩化物量に関して修正を行った結果、潜伏期はB桁のほうがC桁よりも長いという評価になっているが、第三者影響度の場合は加速期以降の期間が特に短くな

表-7 各性能の寿命

	耐荷性能 (Case3)	使用性能 (Case3)	第三者影響度 (Case3)
A桁	52.8	47.0	39.8
B桁	51.4	46.8	41.5
C桁	52.0	46.8	40.5

(単位:year)

表-8 詳細法⁷⁾との寿命比較

	耐荷性能(年) Case2	使用性能(年) Case2	詳細法(年)
A桁	57.5 (44.3)	48.7 (44.7)	46.6
B桁	59.9 (46.3)	50.5 (46.8)	47.9
C桁	57.9	49.2	64.3
平均値	58.4 (49.6)	49.5 (47.0)	52.9

※()内の数値は換算ひび割れ幅補正による

表-9 点検時の点数と寿命(Case3)

	耐荷性能(点)	使用性能(点)	耐荷性能寿命(年)	使用性能寿命(年)
A桁	68.7	10.1	49.5	44.4
B桁	70.5	30.5	49.6	45.4
C桁	70.9	41.5	52.0	46.8
平均値	70.0	27.4	50.3	45.6

表-10 アンケートの結果

	耐荷性(点)			使用性(点)			寿命(年)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
A桁	29.2	60.0	15.0	27.5	50.0	10.0	49.7	55.0	46.0
B桁	29.2	65.0	15.0	26.7	50.0	10.0			
C桁	43.3	70.0	30.0	40.0	60.0	20.0			

そのため、ひび割れ補正の影響が小さく、このような結果になったと考えられる。

また、表-8 に示すように安全性指標 β による詳細法⁷⁾とCase2について比較すると、A・B・C桁で、寿命に達する順序が異なっている。これは、A桁・B桁での換算ひび割れ幅の設定が小さすぎたことが原因である可能性がある。そこで、逆にA・B桁とC桁の寿命の順序が詳細法と合致するよう、はく落の換算ひび割れ幅を調整すると33mm程度となった。ただし、このとき露出鉄筋2本の場合は1本の場合の1.5倍の換算ひび割れ幅とした。この評価結果は表-8の括弧内に示す。その結果、全桁の平均値で比較した場合にはほぼ対応がとれている。

表-9 に本手法で得られた点検時の評価値(換算ひび割れ幅は33mm)と、表-10 に橋梁管理者6名に対しアンケートを行った結果(点数)を示す。耐荷性については、橋梁管理者の平均値でみると、本手法による評価よりもかなり安全側の評価をしていることが分かる。最も高い点と本手法での結果がほぼ一致する結果となった。寿命については、全桁の平均値でほぼ対応がとれる結果となった。

5. まとめ

本研究では、鉄筋腐食による劣化予測に基づいた評点化による評価を行った。以下に明らかになった知見を示す。(1) ひび割れが進行した

RC橋を評価するにあたっては、点検時にひび割れ幅のデータを得ることにより、劣化予測の精度を格段に向上させることができた。(2) はく落が起きている箇所ではひび割れ幅33mm以上で換算することが妥当であった。(3) 橋梁管理者に対するアンケートの結果と比較し、管理者は、本手法において設定した性能限界よりかなり安全側の評価基準で判断しているといえた。

今回の検討では対象橋梁が1橋のみであったため、今後複数の橋梁に対して評価を行い、検討を進めていく必要がある。比較を行い、妥当性と改良点について検討した。

謝辞

現場試験でご協力をいただきました兵庫県県土整備部に感謝いたします。

参考文献

- 1) CEB bulletin 243 : Strategies For Testing and Assessment of Concrete Structures Guidance Report, 1998.5.
- 2) 狩野裕之, 森川英典 : コンディションレーティング(評点法)に基づく劣化RC橋の簡易性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1805-1810, 2003.
- 3) 岸雅之・森川英典・大山慎一 : 鉄筋腐食劣化を考慮したRC部材の性能評価の評点化手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1171-1176, 2001.7.
- 4) 土木学会 : コンクリート標準示方書「維持管理編」, 2001.1.
- 5) 土木学会 : コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠した維持管理マニュアル(その1)および関連資料, 2003.11.
- 6) 日本コンクリート工学協会 : コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998.10.
- 7) 小島大祐, 森川英典, 森田祐介 : 実橋における変状を考慮した塩害劣化RC橋の劣化予測と安全性評価, 土木学会関西支部年次学術講演概要, V-24, 2004.5.