

# 論文 コンクリートコア試験に基づく橋梁健全度評価システムの検証法に関する一提案

高橋 順<sup>\*1</sup>・江本 久雄<sup>\*2</sup>・宮本 文穂<sup>\*3</sup>

**要旨:** 橋梁の長寿命化のためには適切な健全度評価に基づく維持管理が必要になる。そして橋梁の健全度にはさまざまな影響因子があるため、情報处理的な手法を用いた健全度評価システムの適用が有効となる。一方、目視点検をもとにした健全度評価システムでは点検精度や評価基準など、評価結果に影響する部分の検証という課題もある。本論文では、実橋の目視点検をもとに健全度のシステム評価を行った結果と実橋から採取したコアの劣化評価結果を比較検討することで、目視点検結果が内部の劣化をどの程度反映できているか、などについて述べる。

**キーワード:** コンクリートコア試験, 余寿命予測, 近接目視点検, 塩化物イオン, 健康診断, BREX

## 1. はじめに

近年、橋梁長寿命化に対する取り組みが盛んにおこなわれている。その取り組みでは健全度保持のための対策、効果的な計画に基づく管理といった面からの対応など、種々の着眼による検討がなされている。こういった検討の中では橋梁維持管理支援システムの活用が大きな力になると考えられる。一例としてあげることができる「橋梁維持管理支援システム (J-BMS)」は、「橋梁維持管理データベースシステム」、「橋梁劣化診断エキスパートシステム (Bridge Rating EXpert system: BREX)」および「橋梁維持管理計画策定支援システム」を統合した支援システムである<sup>1),2)</sup>。橋梁の長寿命化に対するシステム適用の取り組みを考えると、まずは健全度の評価が適切にできることが重要と考えられ、J-BMS 内の劣化診断システムである BREX が重要な位置づけになる。

BREX は橋梁管理者および専門技術者が橋梁の総合的な劣化診断を行う際に支援するシステムである。システムには使用条件、環境条件、目視点検結果を入力し、橋梁点検時の性能を部材ごとに「耐荷性」および「耐久性」の評価レベルで出力する。また、その評価レベルを健全度とし、余寿命も出力できる。この情報处理的な手法を用いたシステム評価は影響要因が多い場合や評価の安定性を考えると有効な手段と考えられる。しかし一方で、シス

テム評価の場合、目視点検による入力データについてニューラルネットワークでの統合評価やファジー推論の組み合わせなど、入力データに対する処理が複雑であるため、点検者にとってはシステム評価がどの程度信頼性のある結果であるかの判断が難しく、また適用の際には何らかの形で検証が必要となるという課題がある。

そこで本研究では、目視点検を行った橋梁から採取したコンクリートコアの実測情報をもとに劣化状況や劣化進行の予測を行い、コア抜き調査が目視点検による評価のばらつきやそれに付随するシステム評価の曖昧さを効果的に補完できる可能性があるかどうかに着目した検討を行った。この結果が耐久性を含めた将来予測の確度向上に繋がれば、維持管理計画の策定や予防保全などにも有益な情報を提供できると考えられる。

## 2. 検討の目的と考え方

### 2.1 目視点検結果における内部劣化の反映

実橋の目視点検結果を、実橋から採取したコアの劣化評価と比較検討することにより、目視点検結果に内部劣化がどの程度反映できているのかなどを考える。コアの劣化評価は、対象の RC 橋が表-1 に示すような川の水の環境、すなわち海水に近い塩化物イオンを含んだ川の水がある環境であることから塩化物イオンの影響を主とし

表-1 川の水の分析による環境評価

試料	B	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Fe	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
満潮時の川水	1.8	5500	840	0.4	0.6	<0.1	270	310	0.2	11000	2300
干潮時の川水	0.5	2400	360	0.9	1.4	<0.1	110	140	0.5	4900	660
河口の海水	2.5	7600	1200	0.1	0.3	<0.1	380	390	N. D	16000	2300

Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Be, Pb は不検出

定量下限濃度: 0.1mg/ℓ, 検出下限濃度: 0.03mg/ℓ

\*金属分析: ICP発光分析法

\*硫酸イオン: イオン黒間とグラフ法

\*塩素イオン: 硝酸銀滴定

\*1 電気化学工業株式会社 中央研究所 博士(工学) (正会員)

\*2 有限会社ミツワ電器 情報システム開発室 博士(工学) (正会員)

\*3 山口大学 大学院理工学研究科教授 工学博士 (正会員)

た。中性化の影響も調べたが、塩害に比べ影響が小さいことから主たる劣化要因は塩害として検討を行った<sup>3)</sup>。

## 2.2 システム評価における内部劣化の反映

健全度のシステム評価を行った結果<sup>4)</sup>において、評価の基準として活用する「教師データ」の違いによる内部劣化を反映した耐久性評価の違いを考える。教師データは専門家によりアンケート形式<sup>5)</sup>で作成された目視点検評価データを指し、エキスパートシステムではこれをもとに情報処理の手法で結果を導出するため、教師データは健全度の評価結果に影響する。したがって、教師データの選択によって内部劣化をある程度反映できる結果が得られるのかどうかを確認することは、システム評価にとって重要と考えられる。

## 2.3 システム評価による余寿命評価の判定基準

健全度のシステム評価では余寿命の推定も重要な評価項目となるが、その判断基準が塩化物イオンによる鉄筋劣化の推定においてどのようなレベルに対応しているのかを考える。システム評価の判断が妥当なレベルで行われているならば、システム評価の妥当性が検証できるだけでなく、健全度評価の目的によって判定レベルを変えるなどの活用もできると考えられる。

## 3. コンクリートコア試験の結果

### 3.1 コンクリートコア採取

供用開始から74年経過した実橋の劣化状態を目視点検

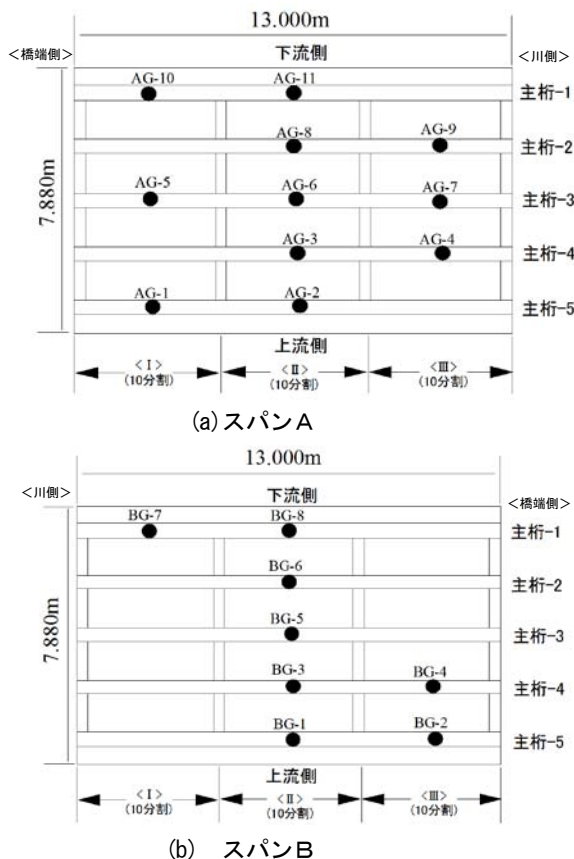


図-1 調査スパンでのコア抜き位置

し、点検した2スパンの主桁からコンクリートコアの採取を行った。採取位置を図-1の(a), (b)に示す。各スパンの横桁を目安に領域ⅠからⅢに3分割し、各領域の中央付近からコンクリートコアを採取し、各領域の平均的なコンクリートの内部劣化状態を示すものと仮定して検討を行った<sup>6)</sup>。スパンAでは図の右側が川側、左側が橋端側、スパンBでは図の左側が川側、右側が橋端側になる。また、図の上側が下流側、下側が上流側である。

### 3.2 塩化物イオン濃度の分析結果

採取したコンクリートコアの深さ方向で0~70mmの範囲を5分割して塩化物イオン濃度を分析した。測定はJISの硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154:2003)に従った。その分析結果をもとに塩化物イオンの拡散にかかわる係数を次式により求めた。

$$C(x,t) = C_0 \cdot (1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{(D \cdot t)}} \right]) + C(x,0) \quad (1)$$

ここで、 $C(x,t)$ は時間 $t$ における深さ $x$ での塩化物イオン濃度、 $C_0$ はコンクリート表面の塩化物イオン濃度、 $D$ は塩化物イオンの見かけの拡散係数である。

結果を表-2に示す。表-2には図-1の各位置でのコアの $C_0$ と $D$ 、そしてこの係数を用いてかぶり45mmの鉄筋位置での塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg/m}^3$ になるまでの時間を潜伏期 $T$ として算出した結果も併記する。これより表面塩化物イオン濃度 $C_0$ は $1.7 \sim 4.4\text{kg/m}^3$ (平均値: $2.7\text{kg/m}^3$ )、みかけの拡散係数 $D$ は $0.8 \sim 2.4\text{cm}^2/\text{s}$ (平均値: $1.5\text{cm}^2/\text{s}$ )で、鉄筋の錆発現開始の目安となる潜伏期は平均で50年程度と推定できた。

表-2 塩化物イオン濃度の分析による解析結果

主桁位置	コア採取位置	表面塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	みかけの拡散係数 × 10 <sup>-8</sup> (cm <sup>2</sup> /s)	潜伏期 T (年)	
Span-A	I	AG-1	3.3	1.6	25
	II	AG-2	2.4	2.4	30
	II	AG-3	3.3	1.7	23
	III	AG-4	2.9	2.0	24
	I	AG-5	2.1	1.2	84
	II	AG-6	2.8	1.2	43
	III	AG-7	3.7	1.5	22
	II	AG-8	2.1	1.8	60
	III	AG-9	2.7	1.4	40
	I	AG-10	1.9	1.5	93
	II	AG-11	2.7	1.1	50
Span-B	II	BG-1	1.7	1.8	126
	III	BG-2	4.4	1.6	17
	II	BG-3	2.8	1.2	43
	III	BG-4	3.1	0.9	48
	II	BG-5	2.3	1.4	56
	II	BG-6	2.5	1.2	53
	I	BG-7	2.9	0.8	60
	II	BG-8	2.4	1.4	51

#### 4. 耐久性評価

##### 4.1 目視点検による耐久性評価

図-1の各スパンを6人の専門家が目視点検し、指摘した変状(ひび割れ, 剥離, 鉄筋露出)に対し耐久性の評価を行った。対象としたのは1935年に架設された橋長364m, 径間数28の鉄筋コンクリート(RC)-T単純支持桁橋で, 老朽化が激しいことが主な理由で解体・撤去が決まった橋である。また, 評価を行った6人の専門家は, 複数の民間コンサルタント会社などで点検を含む維持管理業務に長年(10~20年)携わってきた専門技術者である。専門家による点検とはいえ, 経験や判断基準などにより点検結果や評価にばらつきがあることも報告されている<sup>7)</sup>。そこで本検討では, 図-1の領域Ⅰ~Ⅲのそれぞれについて10分割し, 点検者に指摘した劣化損傷部の耐久性評価(点数評価は劣化過程を潜伏期→進展期→加速期→劣化期とし, 50点が進展期から加速期に遷移する状態, 30点が劣化期に入った状態に対応するとの考えをもとに)をしてもらった。そして次式により各領域の評価点を求めた。

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{10} Q_i}{\sum_{i=1}^{10} N_i} \quad (2)$$

ここで,  $Q$ はスパン長を3分割した各領域での各変状の耐久性評価点,  $Q_i$ は指摘した変状の耐久性評価点,  $N_i$ の総和が各変状の指摘数である。

6人の点検者の中で各変状と耐久性評価点の相関が確認された点検者Aの場合について, 目視点検による耐久性評価点と鉄筋位置での塩化物イオン濃度から推定した耐久性にかかわる劣化状態との関係を図-2~図-4に示す。

##### (1) ひび割れに着目した耐久性評価点

図-2より点検者Aのひび割れによる耐久性評価では, 潜伏期以降の経過時間が長くなるほど劣化評価レベルが小さくなる傾向がわかる。

##### (2) 剥離に着目した耐久性評価点

図-3は次式で表される鉄筋の付着強度比 $\beta$ <sup>8)</sup>と剥離の耐久性評価点の関係を示したもので, 剥離の耐久性評価点が50点以下のときに $\beta$ が小さくなる傾向がみられる。

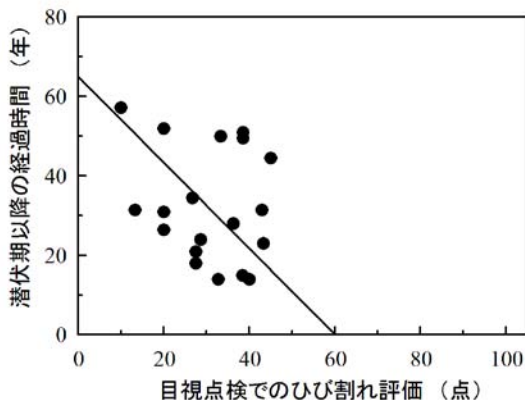


図-2 ひび割れの耐久性評価点と潜伏期以降の経過時間

$$\beta = \frac{\tau}{\tau_0} = e^{-0.0607 \cdot C} \quad (3)$$

ここで,  $\tau_0$ は健全鉄筋の付着強度,  $\tau$ は腐食鉄筋の付着強度,  $C$ は腐食による鉄筋の質量減少率(%)である。

##### (3) 鉄筋に着目した耐久性評価点

図-4は目視点検での鉄筋露出など鉄筋に対する耐久性評価点と塩化物イオンによる鉄筋腐食の錆量の関係であるが, ここからは鉄筋評価点が小さいときに鉄筋錆量が大きくなるといったはっきりした傾向はみられない。なお, 鉄筋腐食の錆量は, 環境温度と塩化物イオン濃度を考慮できることから, 次の腐食速度式から求めた時系列の腐食量を累積し, 累積腐食量 $W$  (mg/cm<sup>2</sup>)とした<sup>8), 9)</sup>。

$$y = -20.6 + 0.562 \cdot t + 8.67 \cdot CI \quad (4)$$

ここで,  $y$ は鉄筋の腐食速度(mg/cm<sup>2</sup>/年),  $t$ は温度(°C),  $CI$ は鉄筋位置での塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)である。

##### (4) 鉄筋腐食錆量と各変状の耐久性評価点の関係

点検者A, B, Cの3人のひび割れ, 剥離, 鉄筋の各変状に対する耐久性評価点とコア試験の結果から求めた鉄筋累積腐食量の関係について調べた。手法としてはラフ集合<sup>10)</sup>によるルール抽出を利用したもので, 各点検者の評価点が鉄筋累積腐食量の多い少ないを判別できているかどうかを調べた。

その結果, 点検者Aは「剥離」または「鉄筋」の耐久性評価点が低いときに鉄筋腐食錆量が多くなるルールが, 点検者Bは「ひび割れ」と「剥離」の耐久性評価点と

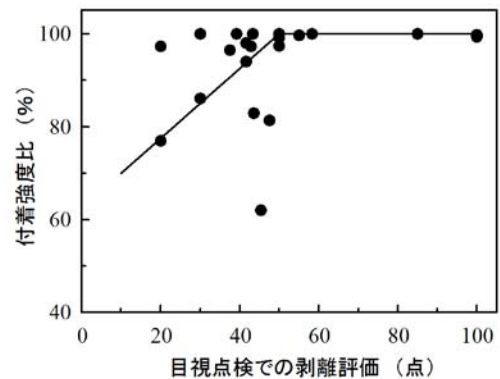


図-3 剥離の耐久性評価点と鉄筋付着強度比

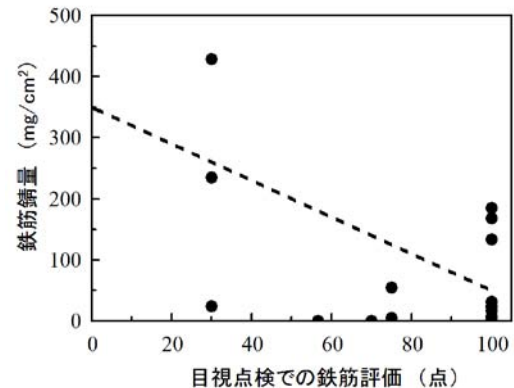


図-4 鉄筋の耐久性評価点と鉄筋錆量



もに低いときに鉄筋累積腐食量が多くなるルールが抽出された。これに対し、点検者Cの場合は耐久性評価点と鉄筋累積腐食量の関連を示すルールが抽出できなかった。このことから、BREX(橋梁劣化診断エキスパートシステム)で用いる教師データとしてどの点検者の評価値を用いるかは、鉄筋腐食を反映した耐久性評価になるかどうかに影響することが考えられる。

#### 4.2 システム(BREX)による耐久性評価

BREXにおいて4.1で示した点検者Aを教師データとし、図-1の各スパンの各領域ごとに耐久性評価を行った。この各部でのシステム評価点<sup>4)</sup>と、鉄筋位置での塩化物イオン濃度から推定した耐久性にかかわる劣化状態との関係を調べた。

##### (1) 潜伏期以降の経過時間との関係

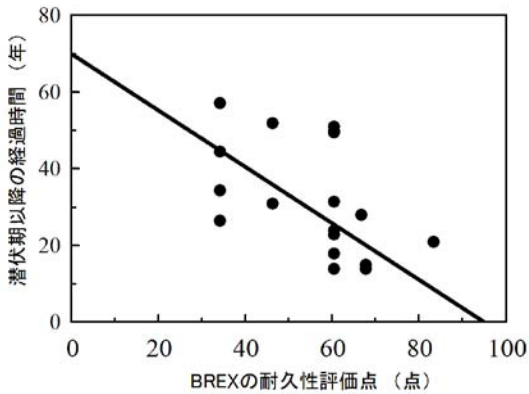


図-5 システムの耐久性評価点と潜伏期以降の経過時間

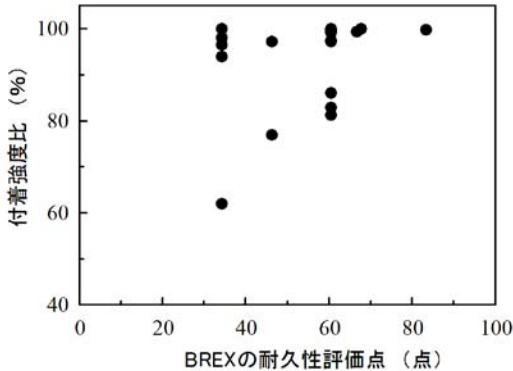


図-6 システムの耐久性評価点と鉄筋付着強度比

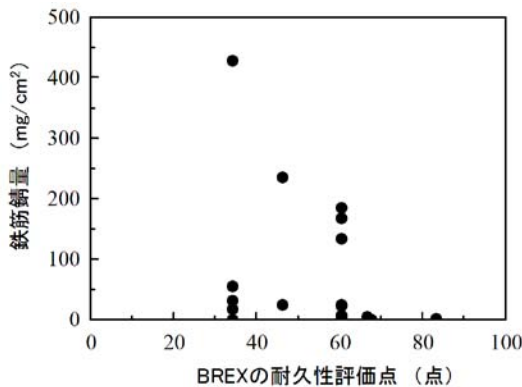


図-7 システムの耐久性評価点と鉄筋錆量

図-5より、潜伏期以降の経過時間が長くなるほどシステムでの耐久性評価点が小さくなる傾向がある。

##### (2) 付着強度比との関係

図-6より、鉄筋の付着強度比はシステムによる耐久性評価点が60点より小さいときに低下する傾向がみられるが、低下の大きさにはばらつきがあることがわかる。

##### (3) 鉄筋錆量との関係

図-6より、システムでの耐久性評価点が小さい場合には、鉄筋の累積腐食量が少ない場合もあれば多い場合もある。また、耐久性評価点が60点以下のときに鉄筋の腐食錆量の増加がみられる。

##### (4) BREX耐久性評価点と点検結果の関係

点検者の指摘変状部に対する耐久性評価とBREXシステムでの耐久性評価点の関係について、ラフ集合<sup>10)</sup>の手法を用いて調べた。解析の要因として、図-1の主桁番号、コアの採取領域<sup>6)</sup>、点検者のひび割れ、剥離、鉄筋の各変状に対する耐久性評価点の5つを選択し、システム評価での結果が「健全度が悪い」となるときのルールの抽出を行った。抽出したルールへの5つの要因の影響度合いを示したのが図-8である。なお、点検データはA, B, Cの3人の点検者のものを用い、BREXシステムでの評価での教師データもこれになった。図-8は「健全度が悪い」となるときのシステム評価点への各要因の影響度を示したもので、劣化位置の影響が大きいのか、点検者の出したどの変状に対する評価点の影響が大きいのかを示したものである。図-8(a)は点検者Aを教師データとしたシステム評価への各要因の影響度で、目視点検データや位置情報が偏らずにシステム評価に反映されていると考えられる。一方、図-8(b)は点検者Bを教師データとした場合で、主桁の位置情報が目視点検の結果に比べ大きくBREX評価に影響している傾向がみられ、点検者Cの図-8(c)では目視点検でのひび割れ評価の結果がBREX評価には反映されていないことがわかる。これにより、BREXシステムの耐久性評価では教師データの選択が重要と考えられる。

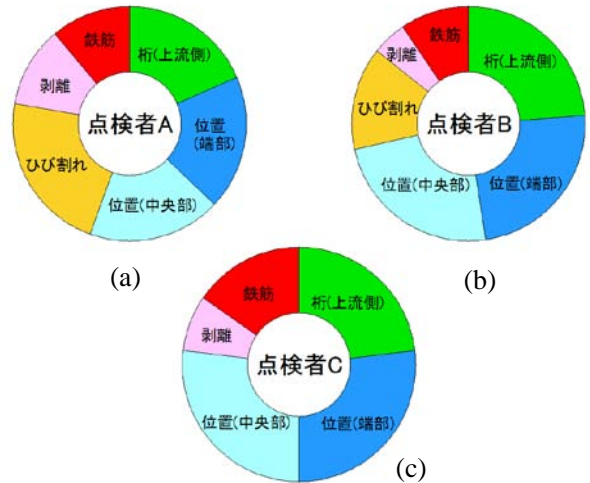


図-8 システムの耐久性評価点と鉄筋錆量

## 5. 余寿命推定

### 5.1 潜伏期をもとにした余寿命推定

3.で述べた塩化物イオンの拡散に起因した鉄筋腐食に着目した余寿命推定を考える。鉄筋腐食は塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg/m}^3$ 以上で発現するとされており<sup>9)</sup>、鉄筋腐食の進行は塩化物イオン濃度がこの値に達するまでの潜伏期Tをもとに考えることができる。

図-9にコア試験から求めた表-2の潜伏期TとBREXシステムによる耐久性評価の関係を示す。図より、潜伏期Tが長くなるとBREXシステムの評価点が良くなる傾向がみられる。したがって、鉄筋腐食の進行における潜伏期(T)、進展期(0.4T)、加速期(0.5T)、劣化期(0.3T)を含めた2.2Tを寿命と考える<sup>8),9)</sup>。したがって余寿命Rは、供用年をN、潜伏期をTとして次式で表される。

$$R = 2.2 \cdot T - N \quad (5)$$

図-10に式(5)で求めた余寿命RとBREXの健全度評価から求めた余寿命の比較を示す。BREXの健全度評価から求める余寿命は、点検時の健全度を劣化曲線(3次曲線)に当てはめて点検時から健全度0となるまでの時間を余寿命としている<sup>11)</sup>。図-10をみると余寿命が正の値の場合は2つの方法から算出した値に相関がみられるが、潜伏期から算出した余寿命は負の値になる場合があり、そのときは両者に相関はみられない。潜伏期から算出した潜伏期が負の値になるのはコンクリートコアの採取から推定した値で非常に局部的なもののためと考えることもできる

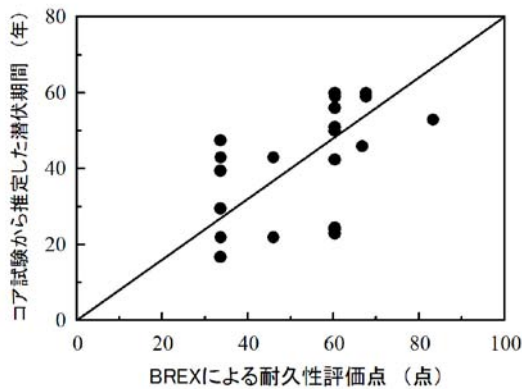


図-9 システムの耐久性評価点と潜伏期間

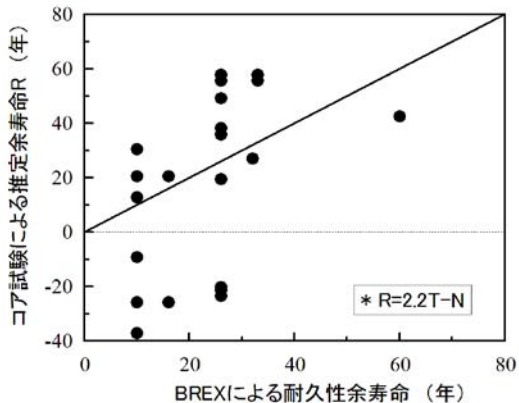


図-10 システムの余寿命と潜伏期をもとにした余寿命

が、局部的にはそのくらい劣化しているとも理解できる。

### 5.2 鉄筋腐食の累積錆量をもとにした余寿命推定

塩化物イオンによる鉄筋の累積腐食量で余寿命推定を行うことを考える。この場合、寿命と判定する鉄筋の累積腐食量Wを設定して考えることになる。

図-11にBREXの健全度評価をもとに推定した余寿命と塩化物イオンによる鉄筋の累積腐食量の関係を示す。

図より、システムによる余寿命推定値が30年より小さい場合に鉄筋の累積腐食量が多いことがわかる。また、余寿命が小さくなったとき、累積腐食量の増加が非常に大きいものとそうでないものに分かれることがわかる。

鉄筋の累積腐食量の評価基準としては中性化によるひび割れ発生腐食限界量は $10\text{mg/cm}^2$ とされている<sup>12)</sup>ことを参考に、10倍の $100\text{mg/cm}^2$ の値を設定している報告<sup>8)</sup>がある。これらのことから、図-11の数百 $\text{mg/cm}^2$ になる大きな累積腐食量はコンクリートの剥落や鉄筋の露出など周辺の劣化状態がかなり悪い場合が考えられる。そして図-10の潜伏期から算出した余寿命が負の場合がこれに当てはまる場合と考えられる。したがって、事前に余寿命を推定する観点から図-11で累積腐食量が数百 $\text{mg/cm}^2$ にならない外挿線の方で考える。図-11で余寿命が0年の時の鉄筋累積腐食量が余寿命判定の基準値Wと考えることができる。図-11より基準値Wは $50\text{mg/cm}^2$ と求められる。したがって、表-2のような塩化物イオン濃度の調査結果をもとに鉄筋の累積腐食量が $W=50\text{mg/cm}^2$ となるとときの余寿命を求めればよいことがわかる。

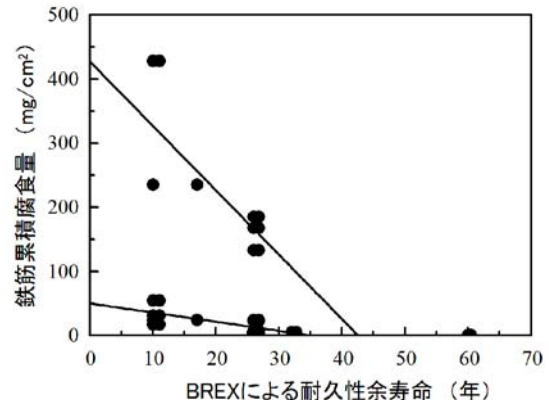


図-11 システムの余寿命と鉄筋累積腐食量

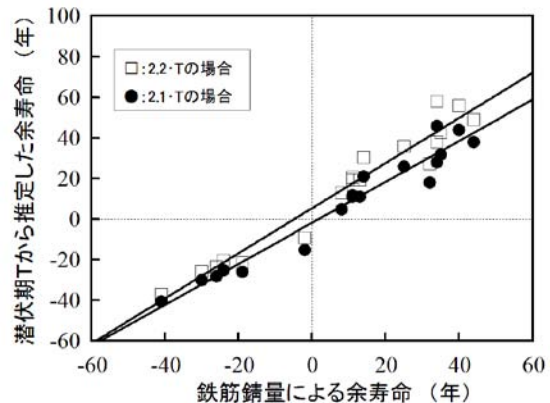


図-12 推定余寿命の比較

次に鉄筋の累積腐食量による余寿命算出と潜伏期を利用した余寿命算出の比較を行う。この結果を図-12に示す。図には潜伏期をもとにした評価として、2.2Tで算出した結果と2.1Tで算出した結果を示した。図より、余寿命推定では2.1Tを用いた方が鉄筋累積腐食量による余寿命推定との整合性がよいと考えられる。

### 5.3 耐久性にかかわる劣化曲線に関する考察

BREXの健全度評価から余寿命推定を行う際の劣化曲線は、耐久性の場合、材料劣化に起因するものとして次の3次関数で表される<sup>5), 11)</sup>。

$$S_D = b_D - a_D t^3 \quad (6)$$

ここで、 $S_D$ は耐久性指標、 $t$ は橋齢、 $b_D$ は供用開始時の値として100を設定、 $a_D$ は経年劣化に依存した係数。そこで、表-2に示したコア試験結果から算出した塩化物イオンによる鉄筋累積腐食量の時間変化について調べた。

図-13に目視点検とコア抜き調査を行った時の実測値をもとに、前後10年の鉄筋累積腐食量の計算値を示す。これは点検調査の10年後までを想定して、劣化状態の予測を行う場合と考えることができる。算出結果はほぼ3乗に近い2.8乗の関数としてフィッティングできた。したがって、表-2の調査結果のような劣化がある程度進んだ段階での調査結果の場合は10年後の耐久性余寿命を3次の関数で推定できると考えられる。

これより、目視点検をもとにしたBREXの健全度評価をもとにした余寿命推定の確度を上げる上でも、図-1のようなコンクリートコアの採取による実測評価を合わせて実施することが重要と考えられる。

## 6. 結論

本研究は、実橋の目視点検をもとに健全度のシステム評価を行った結果と実橋から採取したコアの劣化評価結果を比較検討し、目視点検結果が内部の劣化をどの程度反映できているかを検討した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) コンクリートコア試験による塩化物イオン濃度をもとにした鉄筋累積腐食量を $50 \text{ mg/cm}^2$ として余寿命推定を

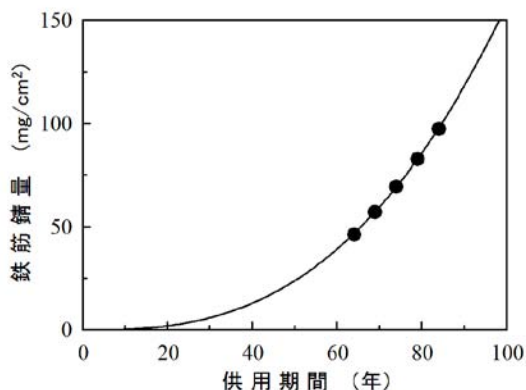


図-13 調査時の鉄筋累積腐食量をもとにした予測

行うと、橋梁劣化診断エキスパートシステムによる余寿命推定結果とほぼ同じ評価となる。

(2) 鉄筋位置での塩化物イオン濃度が $1.2 \text{ kg/m}^3$ となる潜伏期 $T$ をもとに、 $2.1T$ を寿命とすると鉄筋の累積腐食量を $50 \text{ mg/cm}^2$ で推定した余寿命がほぼ同じ値となる。

(3) 目視点検をもとにしたBREXの健全度評価で用いる教師データは劣化要素を偏らずに反映することが必要で、そうした教師データによる評価では実測値の塩化物イオン濃度をもとにした鉄筋腐食の耐久性評価とも相関すること、そのためには質の高い教師データの選択が重要であることがわかった。

## 参考文献

- 1) 宮本文穂, 申田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・フuzzyエキスパートシステムの開発と信頼性の向上, 土木学会論文集, 510-VI-26, 91-101, 1995.3.
- 2) 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, 588-VI-38, 191-208, 1998.3.
- 3) 高橋順, 宮本文穂, 江本久雄: コンクリートコア試験を利用した撤去橋梁の余寿命推定結果の検証, 土木学会年次大会, VI226, 2011.
- 4) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順: 近接目視点検による撤去橋梁の健康診断と余寿命推定, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第11巻, pp.431-438, 2011.10.
- 5) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順: 旧厚東川大橋の果たした役割と撤去時健康診断, 社会基盤マネジメントシリーズ No.15, 山口大学安全環境研究センター, 2011.3.
- 6) 中村秀明, 高橋順, 江本久雄, 宮本文穂: 海洋環境下におけるコンクリート中の塩分測定のために関する研究, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.31, No.2, 1549-1554, 2009.
- 7) 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂, 今井宏: 専門家による既存 RC 橋の目視点検結果と評価のばらつき, 土木学会第 64 回年次学術講演会, VI.372, 2009.
- 8) 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, (社)土木学会, コンクリート技術シリーズ No.71, 2006.
- 9) コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)委員会報告書, (社)土木学会, 2009.
- 10) Z.Pawlak: Rough sets, Int. J. Inform. Comput.Sci., Vol.11, No.5, pp341-356, 1982.
- 11) 宮本文穂, 中村秀明, 山岡健一, 河村圭: Bridge Management System (BMS)の実橋への適用に関する研究, 第 49 巻, 第 2 号, 山口大学工学部研究報告, 1999.3.
- 12) コンクリート標準示方書 [維持管理編], 土木学会コンクリート委員会, (社)土木学会, 2007.