

# 論文 現場試験に基づく老朽橋梁の余寿命推定と J-BMS RC 版による 診断結果の検証

宮本文穂\*<sup>1</sup>・浅野寛元\*<sup>2</sup>

**要旨**：既存橋梁の健康(健全度, 余寿命)診断手法として, 近接目視点検結果を情報処理的な手法により解析するJ-BMSなどの評価システムの有効性が知られている。しかし, 橋梁によって健全度に影響する因子や度合いが異なる場合なども含め, コンクリートコア試験などの実測調査による検証も必要となる。本論文では, 山口県内の老朽橋2橋を対象に橋梁各部から抽出したコンクリートコア試験および解体時の主桁切断面試験結果から, 劣化要因を考慮した客観的な余寿命推定手法についての検討結果を述べ, 得られた結果に基づいてJ-BMS RC版の信頼性を余寿命推定結果の観点から検証する。

**キーワード**：老朽橋, 主桁切出し, コンクリートコア, 余寿命推定, 塩化物イオン, 中性化, J-BMS RC版

## 1. はじめに

既存橋梁の健全度保持のための対策, 効果的な計画に基づく管理対策といった面などから, 橋梁の長寿命化対策が進められている。長寿命化対策では, 常に橋梁が健全であるかどうかの診断を行う必要があるが, また, 老朽化による撤去という判断も選択肢の一つになると考えられる。このような判断を行うときは, 適切な健全度評価, 余寿命評価<sup>1)</sup>が重要になる。

その評価の方法の一つとして「橋梁維持管理支援システム (J-BMS)」<sup>2)</sup>があげられるが, この中では「橋梁劣化診断エキスパートシステム (Bridge Rating EXpert system: BREX)」<sup>3)</sup>がこれにあたる。BREX システムは使用条件, 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」の評価レベルを出力するシステムで, 評価レベルは健全度あるいは余寿命として表される。このような情報処理的手法を用いた場合, 影響要因が多い場合でも処理が可能である。しかし一方で, システムの出力結果をコンクリートコア試験などの他の実橋調査による結果との比較などを行いながら検証していくことも必要となる。

そこで本研究では, ほぼ同様の使用環境条件下で老朽化したと考えられる2橋(供用後約70年)の解体時に現場で採取したコンクリートコア試験<sup>4)</sup>および切り出した主桁切断面を利用した中性化深さ試験結果<sup>5)</sup>から, 主たる劣化要因が塩害および中性化の場合の余寿命推定手法について検討した結果を述べる。また, 得られた診断結果に基づいて, J-BMS RC版の信頼性などを余寿命推定結果の観点から検証する。

## 2. 対象とした老朽橋と現場試験の流れ

### 2.1 対象橋梁

本研究で対象とした2橋の老朽化橋(KT橋およびSK橋)

の主要な橋梁諸元および撤去前の形状・寸法を表-1, 図-1(a), (b)にそれぞれ示す<sup>6), 7)</sup>。KT橋は, 橋長364.1m, 径間数28, 全幅員11.7mを有する鉄筋コンクリート(RC)-T単純支持桁橋, 一方, SK橋は, 橋長168.3m, 径間数8, 全幅員11.0mを有するゲルバーヒンジRC-T桁橋で, それぞれ供用後約70年を経て架け替え・撤去の判断に至った橋梁である。本研究で実施したコンクリートコア試験および主桁切断面試験などは, KT橋では架設後72~74年, SK橋では架設後71~72年に行ったものである。また, 試験対象スパンは, KT橋の2スパン(KT橋の両端のスパン)とSK橋の2スパン(SK橋の端のスパンと3径間目のスパン)の合計4スパン分とした(図-1(a), (b)参照)。

### 2.2 現場試験の流れ

KT橋およびSK橋の上述4スパン各主桁側面からコンクリートコアを採取し, 主要劣化要因の特定, 健全度評価および余寿命推定を試みた。コア採取数は各試験項目に対して1つの主桁から2~3本とし, 横桁で分割された領域を目安に橋軸方向で偏らない採取を行った。一例としてSK橋, Span 3の採取位置を図-2に示す。そして, 両橋各スパンでの採取コア数を表-2にまとめて示す。なお, SK橋ではコンクリートコア試験に加えて, 解体時に切断した主桁切断面の観察および中性化深さ試験を試験項目に追加した。SK橋の主桁撤去時には, 図-1(b)に示すSpan 1で49箇所(観察面は54), Span 3で67箇所(観察面は72)で切断されブロック化された。一例として, Span 3の主桁の切断(分割)位置を図-3に示す。

以上のような現場試験に基づいて検討した2橋の健全度評価および余寿命推定の内容と流れを図-4に示す。ここで, STEP-1, STEP-2では, コンクリートコア試験の結果によりKT橋とSK橋の主たる劣化要因の特定を行うとともに, 劣化予測を行うための塩化物イオンの見かけの拡散係数などの必要項目の推定を行った(JIS A 1154)。

\*<sup>1</sup> 山口大学名誉教授(スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)客員教授) 工博(正会員)

\*<sup>2</sup> 宇部興産コンサルタント(株) 博士(工学) (正会員)

STEP-3 の SK 橋における主桁切断面試験では、切断面のひび割れの観察とかぶり厚さの計測および切断面の両側面および下面の中性化深さを、一面あたりほぼ等間隔に 10 点以上でノギスにより計測した(JIS A 1152)<sup>6),7)</sup>。STEP-4 では、コンクリートコア試験の結果から塩害および中性化が主要劣化要因となる場合の余寿命推定について検討する。

### 3. コンクリートコア試験による余寿命推定

#### 3.1 余寿命推定の流れ

本研究では、まず両橋の主たる劣化要因（中性化あるいは塩害）の特定を行う。その結果、塩害劣化が主の場合には、コンクリートコア試験により得られた結果を利用して時間  $t$  における鉄筋位置での塩化物イオン濃度を求め、これから求まる鉄筋腐食速度をもとに評価年までの鉄筋累積腐食量を算出する。一方、中性化劣化が主の場合には、鉄筋を腐食させる因子（水分や塩化物イオンなど）の劣化進行に影響する環境を提供するものと考え、中性化範囲の進行を考慮した鉄筋累積腐食量を算出する。そして、劣化要因に則した手法で算出した累積腐食量が限界値に至った時を寿命と仮定する。したがって、余寿命の推定には鉄筋腐食量の推定と寿命を仮定するための鉄筋腐食量の設定という情報が必要となる。

上述の余寿命推定のフローを、内陸橋も含めた汎用法として図-5 に示す。コア試験での中性化残りが 10mm より大きいかな否かで [YES] の流れと [NO] の流れに分岐する。[YES] および [NO] の流れは、それぞれ主たる劣化要因が塩害の場合および中性化の場合である。

[YES] の流れでは、塩化物イオンの拡散により進行する鉄筋腐食量を次式の腐食速度式を適用して<sup>8)</sup>予測し、余寿命推定に反映する：

$$V = -20.6 + 0.562 \cdot tmp + 8.67 \cdot Cl \quad (1)$$

ここで、 $V$  は鉄筋の腐食速度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $tmp$  は温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $Cl$  は鉄筋位置での塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である。

次いで、鉄筋位置での各時間の塩化物イオン濃度を求め、これを式(1)に代入して鉄筋の腐食速度を求める。これより、時間  $t$  での累積鉄筋腐食量  $Q(t)$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) は、時間  $t$  での鉄筋腐食速度  $V(t)$  と積算時の分割時間  $dt$  により次式で求められる：

$$Q(t) = Q_0 + \sum_{t=t_1+dt}^{t=X} \left( \frac{dt}{2} \left( V \left( t - \frac{dt}{2} \right) + V \left( t + \frac{dt}{2} \right) \right) \right) \quad (2)$$

ここで、 $t_1$  は  $V(t_1)=0$  のときの時間で、 $Q_0$  は次式で表される。ただし、 $t \leq t_1$  の時は  $Q_0=0$  とする。

$$Q_0 = \frac{dt}{4} V \left( t_1 + \frac{dt}{2} \right) \quad (3)$$

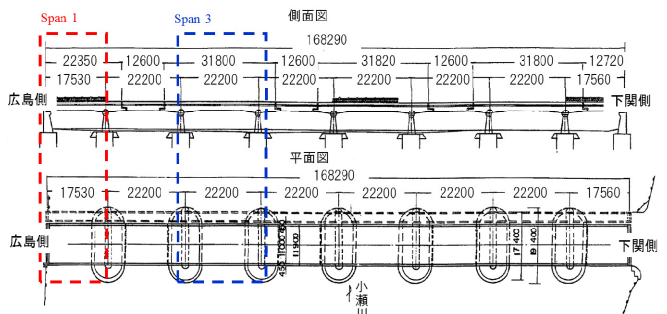
一方、[NO] の流れでは、まず中性化深さの経時的

表-1 設計時の橋梁諸元一覧

橋梁名	KT橋	SK橋
路線名	国道190号線	一般国道2号
架設年	1935年	1941年
床版構造形式	RC床版	RC床版
橋長	364.108m	168.29m
幅員	11.680m	11.0m
径間数	28径間	8径間
主桁構造形式	RC-T桁	ゲルバー-RCT桁
主桁本数	5本	5本
大型車交通量	1500台/日	6900台/日
地域区分	海岸地域(約2km)	海岸地域(約1km)

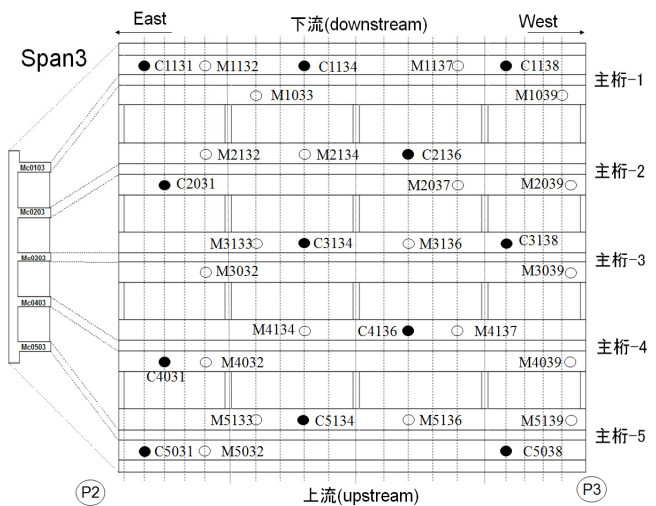


(a) KT橋の試験対象スパン位置



(b) SK橋の試験対象スパン位置

図-1 調査対象橋の概要と試験対象スパン



●：塩化物イオン調査用コンクリートコアの位置  
○：中性化深さ調査用コンクリートコアの位置

図-2 コンクリートコア採取位置の例 (SK橋 Span 3)

表-2 調査対象各スパンでの採取コア数 (本)

橋梁	スパン	圧縮特性		中性化深さ	塩化物イオン濃度
		圧縮強度	静弾性係数		
KT橋	Span A	15	15	14	14
	Span B	11	11	8	8
SK橋	Span 1	15	6	15	11
	Span 3	20	6	20	12

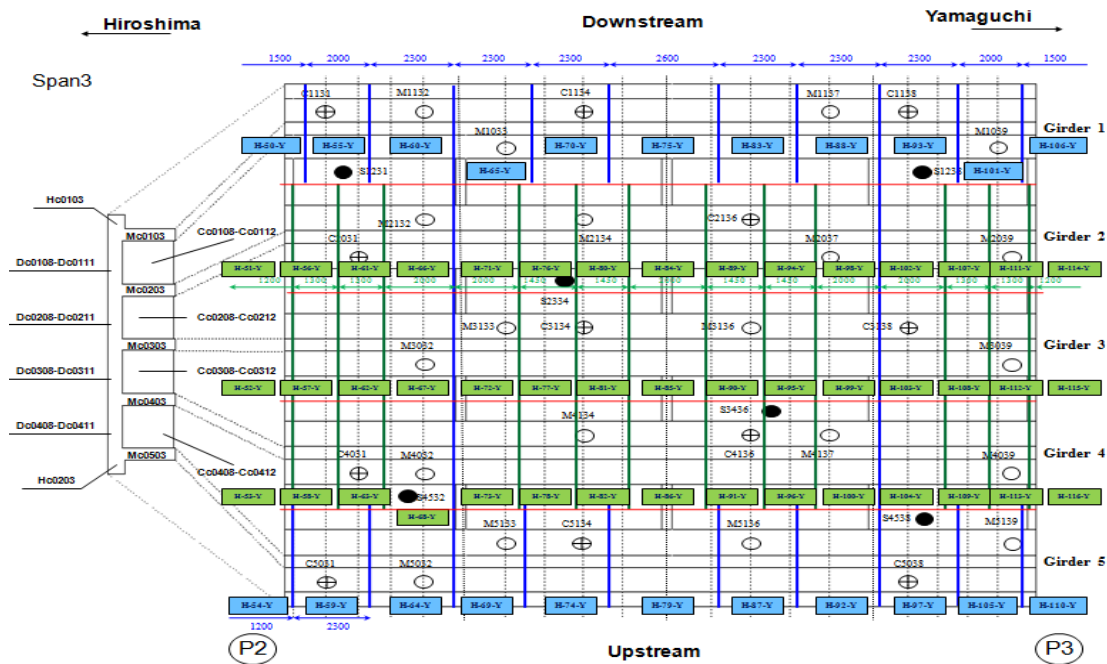


図-3 SK 橋 Span 3 の主桁切断位置 (図中の青線および緑線, なお, 赤線は床板部切断位置)

な推定を  $\sqrt{t}$  則に従って行い, 中性化速度係数  $A$  をある時間  $t$  における中性化深さ  $d(t)$  (ここではコア試験時の中性化深さ) を用いて次式で求める:

$$A = \frac{d(t)}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

そして, 時間  $t$  のときの中性化残り (=かぶり-中性化深さ) が 10mm より大きい場合は式(5), 10mm 以下の場合は式(6)によって鉄筋腐食速度  $V$  を求める<sup>9)</sup>.

$$V = 1.32(CI - 1.2) \times k \quad (5)$$

$$V = (0.840W - 0.145C + 1.32CI + 0.0293W \cdot C - 0.0917C \cdot CI + 0.658CI \cdot W - 2.52) \times k \quad (6)$$

ここで,  $V(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年})$  は鉄筋腐食速度,  $CI(\text{kg}/\text{m}^3)$  は鉄筋位置での塩化物イオン濃度,  $C(\text{mm})$  は中性化残り,  $W(\%)$  はコンクリートの表面含水率である.  $k$  は気温  $tmp(\text{C})$  のときの補正式で, 次式を適用する:

$$k = 1 + 0.0381 \times (tmp - 20) \quad (7)$$

以上のように求めた鉄筋腐食速度を用いて時系列の鉄

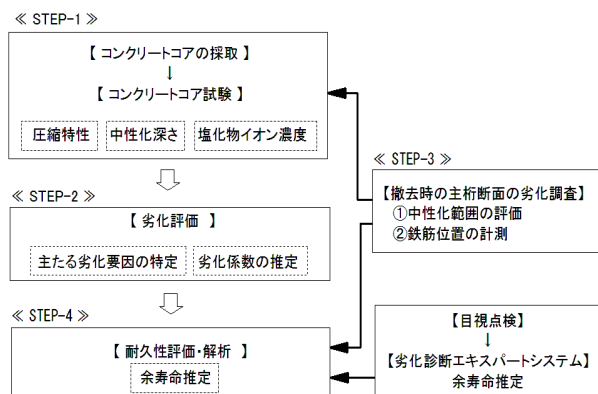


図-4 現場試験の内容と流れ

筋腐食量を求め, 式(2), (3)を用いて累積鉄筋腐食量  $Q(t)$  を算出する。

次いで, [YES] および [NO] の流れで求めた累積鉄筋腐食量,  $Q(t)$  が, 寿命を仮定する限界累積鉄筋腐食量,  $Q_{cr}$  に至ったかどうかを判定する。本研究では, J-BMS RC 版のサブシステムの一つ<sup>10)</sup>である「橋梁劣化診断エキスパートシステム(BREX)」の劣化曲線を用いて得られた寿命に至る限界累積鉄筋腐食量,  $Q_{cr} = 75\text{mg}/\text{cm}^2$  を用いた<sup>7)</sup>。前述の累積鉄筋腐食量,  $Q(t)$  が寿命を仮定する限界累積鉄筋腐食量,  $Q_{cr}$  に至る時間から供用年を差引いた時間(年)を余寿命として定義した。

### 3.2 余寿命推定結果と考察

上述の流れに従って推定した KT 橋および SK 橋の主桁から採取したコンクリートコアについて, 図-5 にしたがって余寿命推定を行った結果をそれぞれ表-3 および表-4 にまとめて示す。表中の「位置座標」はコンクリートコアを採取した主桁での位置を  $(z, y)$  で表したもので,  $y$  は主桁番号,  $z$  は橋軸方向の位置を表す。 $z$  は橋軸方向を 6 分割して 1~7 で表したもので, 図-3 の場合は, P2(East)側の橋端が「1」, P3(West)側の橋端が「7」という設定になる。

KT 橋の場合, ほとんどのコアの中性化深さが 35mm 以下 (中性化残りが 10mm 以上) で, 図-5 における推定の流れは, Span A の 2 点, Span B の 4 点を除き [YES] への流れとなった。表-3 の余寿命推定結果をみると, Span A での最低余寿命年は-23 年, Span B では-10 年と 0 年以下のものがあつた。一方, Span A では余寿命の推定値が 100 年を越える場合もあつた。このため, 表-3 に示す推定結果から単純平均で余寿命を求めると, それぞれ Span A で約 18 年, Span B で約 15 年となった。

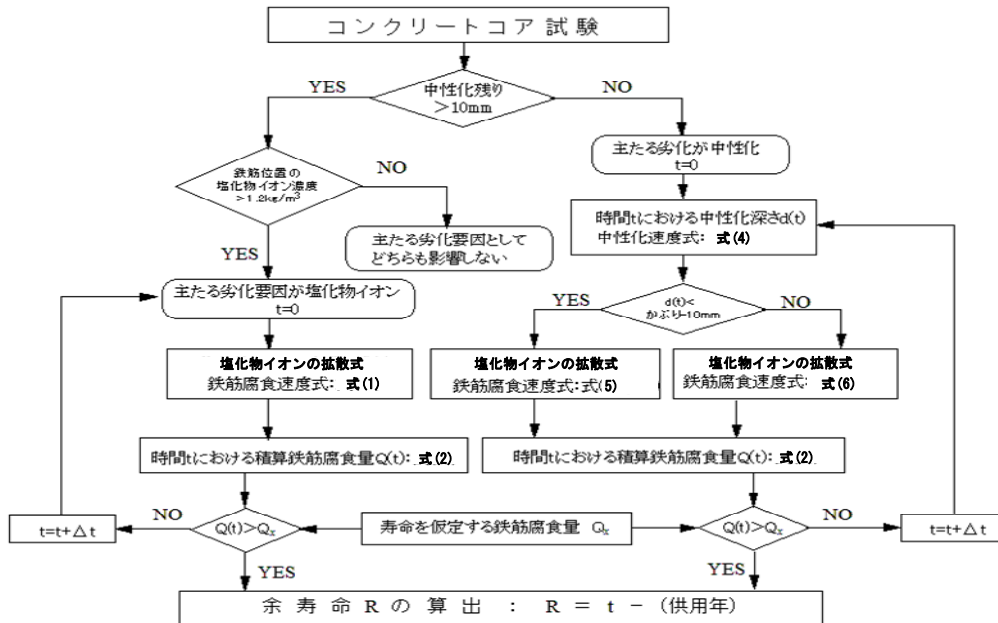


図-5 コンクリートコア試験による余寿命推定の流れ

一方、SK 橋の場合、全てのコアの中性化深さが 35mm

以上で、図-5 における推定の流れは [NO] への流れのみとなった。SK 橋から採取したコアは、塩化物イオンの拡散式<sup>1)</sup>に当てはめて外挿することが難しい場合がみられた。そこで、(a) 鉄筋位置での塩化物イオン濃度を鉄筋位置前後の計測点から外挿した値を用いて鉄筋腐食速度を  $t=0$  のときから計算する方法、(b) 鉄筋位置での塩化物イオン濃度の実測値を通る外挿線で拡散式<sup>1)</sup>の  $C_0$ 、 $D$  を求め、経時的な変化を簡易的に考慮して鉄筋腐食速度を計算する方法、を検討した。余寿命推定結果を表-4 にまとめて示す。その結果、(a)の方法でも(b)の方法でも余寿命推定に大きな差異はない結果となった<sup>4)</sup>。そして、それぞれのスパンで(a)による推定余寿命の平均値は Span 1 では-29年、Span 3 では13年、(b)による推定余寿命の平均値は Span 1 では-22年、Span 3 では14年、となった。これより、Span 1 の余寿命推定値は Span 3 と比べて非常に小さい結果となることがわかる。また、表-4 から Span 1 は中性化深さが大きいだけでなく鉄筋位置での塩化物

表-3 KT 橋の余寿命推定結果

橋梁 (試験時 橋齢)	スパン	コア 番号	主桁	中性化 深さ (mm)	塩化物イオン			位置座標 (z,y)	推定余寿命 (年)
					表面濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	鉄筋位置 での濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	拡散係数 ( $\times 10^{-9}$ cm <sup>2</sup> /s)		
KT橋 (橋齢74 年)	Span A	①	5	20	3.1	1.9	1.8	(1,8,5)	-15
		②	5	45	2.3	1.6	1.6	(4,5)	-12
		③	5	—	2.3	1.4	2.6	(3,5,5)	14
		④	4	43	3.4	2.1	1.8	(4,8,4)	-16
		⑤	4	15	2.5	1.7	3.3	(6,5,4)	-14
		⑥	3	31	2.2	1.2	1.2	(2,3)	101
		⑦	3	23	3.0	1.5	1.1	(4,2,3)	15
		⑧	3	—	2.9	1.3	1.2	(4,2,3)	15
		⑨	3	19	3.8	2.2	1.4	(5,7,3)	-23
		⑩	2	20	2.5	1.2	1.1	(3,7,5,2)	57
		⑪	2	17	2.2	1.4	2.4	(6,2,5,2)	31
		⑫	1	10	2.2	1.1	1.0	(2,1)	13
		⑬	1	0	2.6	1.5	1.1	(4,1)	45
		⑭	1	—	2.6	1.5	1.1	(4,2,5,1)	45
	Span B	⑮	5	39	1.5	1.0	2.8	(6,5)	5
		⑯	5	39	4.6	2.6	1.3	(3,5,5)	-10
		⑰	4	—	2.8	1.6	1.3	(4,4)	16
		⑱	4	—	3.4	1.5	0.75	(6,4)	23
		⑲	3	42	2.3	1.3	1.4	(4,3)	-6
		⑳	2	44	3.0	0.9	0.85	(4,2)	-10
		㉑	1	34	3.2	1.3	0.6	(2,1)	53
		㉒	1	34	2.4	1.2	1.4	(4,1)	53

表-4 SK 橋の余寿命推定結果

橋梁 (試験時 橋齢)	スパン	コア 番号	主桁	中性化 深さ (mm)	塩化物イオン				推定余寿命(年)		
					見かけの 表面濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	初期塩化 物濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	鉄筋位置 での濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	拡散係数 ( $\times 10^{-9}$ cm <sup>2</sup> /s)	位置座標 (z,y)	鉄筋位置の 濃度一定 ①	塩化物の拡 散を考慮 ②
SK橋 (橋齢72 年)	Span 1	①	1	66	1.10	0.60	1.00	0.60	(1,4,1)	-32	-29
		②	1	40	0.60	0.40	0.60	0.50	(3,4,1)	14	16
		③	1	59	0.80	0.60	0.90	0.60	(5,4,1)	-25	-23
		④	2	47	2.30	0.65	1.80	0.90	(3,4,2)	-25	-16
		⑤	3	46	2.50	0.90	2.50	1.80	(1,4,3)	-29	-21
		⑥	3	74	2.60	0.50	2.10	1.80	(4,6,3)	-48	-41
		⑦	3	55	3.80	0.80	3.00	1.50	(5,4,3)	-41	-33
		⑧	4	68	3.10	0.40	1.30	0.40	(3,4,3)	-37	-30
		⑨	5	45	3.90	0.80	3.20	1.80	(1,4,5)	-38	-22
		⑩	5	52	1.80	0.60	1.70	1.80	(4,6,5)	-29	-25
		⑪	5	56	1.40	0.30	1.20	1.80	(5,4,5)	-26	-23
	Span 3	⑫	1	54	0.70	0.40	0.60	0.40	(1,8,1)	-13	-11
		⑬	1	53	0.70	0.30	0.30	0.08	(4,2,5,1)	2	1
		⑭	1	40	0.90	0.30	0.50	0.40	(6,1)	17	18
		⑮	2	43	2.50	0.50	1.20	0.40	(2,2)	-6	-3
		⑯	2	54	1.90	0.65	1.20	0.40	(5,5)	-24	-20
		⑰	3	45	1.00	0.10	0.40	0.40	(4,2,5,3)	11	13
		⑱	3	41	0.70	0.15	0.18	0.10	(7,2,3)	39	39
		⑲	4	58	0.90	0.18	0.20	0.08	(1,5,4)	2	2
		⑳	4	42	1.20	0.12	0.12	0.05	(4,4)	44	41
		㉑	5	57	1.30	0.20	0.20	0.05	(1,7,5,5)	4	3
		㉒	5	37	1.10	0.12	0.12	0.05	(4,2,5,5)	63	60
㉓	5	44	0.80	0.30	0.30	0.05	(6,5)	19	19		

イオン濃度も大きいことがわかる。従って、[NO] への流れの式(5)、(6)で計算する鉄筋腐食速度が大きくなり、結果として余寿命が短くなっているものとする。

#### 4. 主桁切断面試験による余寿命推定

##### 4.1 中性化深さとそのばらつき

SK 橋の主桁撤去時には、Span 1 で 49 箇所、Span 3 で 67 箇所切断されブロック化された。一例として、Span 3 の主桁の切断(分割)位置を前掲図-3 に示す。スパン端部のブロックでは両面、その他のブロックは片側の切断面を観察対象とした。したがって、観察面は Span 1 は 54 面、Span 3 は 72 面となる。観察前に、切断ブロックの観察面を切断時の残差



物が残らないようにサンダー処理と表面清掃をした。その後、切断面のひび割れの観察とかぶり厚さの計測、そして断面全体の中酸化試験を行った<sup>7)</sup>。主桁断面の中酸化試験は、清掃した切断面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧し、コア深さ方向の赤紫色に抵触した部分までをノギスにより測定した。このときの主桁切断面の一例を図-6 に示す。中酸化深さは主桁両側面あたり 10 測点以上の計測を行い、断面内マッピング図を作成した。

現地で測定した中酸化深さの主桁断面内分布の一例を図-7(a), (b) に示す。図-7(a) は中酸化深さが大きい断面の例、図-7(b) は中酸化深さが平均的な断面の例である。図中の補助線の間隔は 10cm で、斜線部分が中酸化した領域である。これより、コンクリートコア試験でコア採取を主桁側面から行う場合、図-7(a) のような中酸化深さのばらつきが大きい場合も存在することを想定する必要がある。

図-8 に、Span 1 および Span 3 で主桁切断面の中酸化試験を行った 126 断面における中酸化深さの平均値と標準偏差の関連を示す。これより、Span 1、Span 3 とも平均値と標準偏差の関係は同様で、中酸化深さの平均値が大きい場合は標準偏差も大きくなり、ばらつきが大きくなる事が分かる。

#### 4.2 余寿命推定結果と考察

SK 橋の Span 1 および Span 3 から採取した全てのコアの中酸化深さが 35mm 以上となったため、図-5 における余寿命推定の流れは [NO] の流れとなる。

ここで、余寿命推定に必要となる各主桁切断面(側面および下面)で計測されたかぶり厚さおよび中酸化深さの平

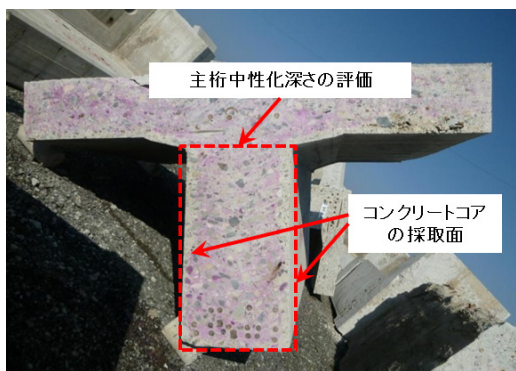
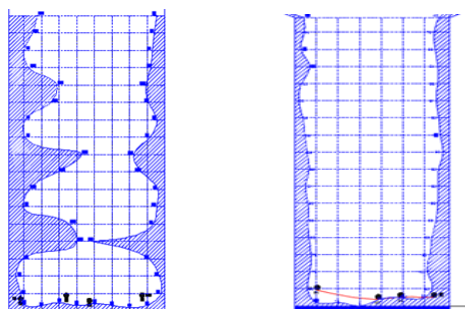


図-6 主桁切断面観察および中酸化試験状況



(a) 中酸化深さが大きい断面 (b) 中酸化深さが平均的な断面

図-7 主桁切断面の中酸化深さの分布例

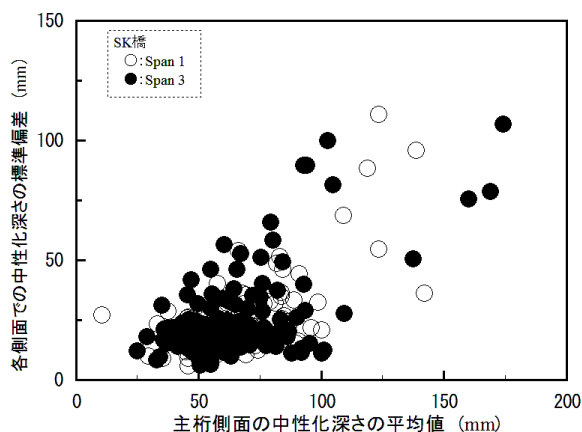


図-8 主桁側面の中酸化深さの平均値と標準偏差例

均(中央)値を利用して(表-5 参照)、図-5 の流れに従った「山側」、「海側」および「下面側」それぞれの余寿命推定(塩化物イオンの影響を考慮)を行った結果を表-5 にまとめて示す。ここで、コンクリート内の平均表面含水率は暴露試験などの結果<sup>11)</sup>を参考に 4%と仮定した。

表-5 より、主桁に配置されている鉄筋表面の累積腐食量が限界累積鉄筋腐食量  $Q_{cr}=75 \text{ mg/cm}^2$  に到達するまでの平均年数(寿命)は、それぞれ海側で 81.5 年、山側で 81.2 年とほぼ同じ推定結果になった。すなわち、余寿命,  $RL$  は、海側:  $81.5-72=9.5$  年、山側:  $81.2-72=9.2$  年となる事がわかる。これに対して、供用後に樹脂材による主桁下面の断面修復工が施された下面側で推定された余寿命,  $RL$  は、 $142.6-72=70.6$  年と推定でき、海側、山側の余寿命に比べて約 60 年の余寿命延伸が予測される。

#### 5. J-BMS RC 版による診断結果の検証

著者らは、これまで独自にコンクリート(RC & PC)橋を対象とする「橋梁維持管理支援システム(J-BMS)」の開発を行ってきた<sup>2,3)</sup>。このサブシステムの一つに「橋梁劣化診断エキスパートシステム(BREX)」があり、健康診断機能を有している。今回、前述のような 2 橋の老朽橋を対象としたコンクリートコア試験および解体時の主桁切断面試験より主要劣化要因を考慮した客観的な余寿命推定結果を、BREX システムによる出力結果<sup>6,7)</sup>と比較することにより、J-BMS RC 版の実用性を検証してみる。

表-6 は、これまで検討した両橋(KT & SK 橋)に対するコンクリートコア試験および現地での主桁切断面試験の実測値を利用して推定した推定余寿命の平均(中央)値と BREX システムによる耐久性の観点からの推定余寿命を比較したものをまとめたものである。これより、BREX システムの場合は現地での近接目視点検データの入力が基本となるが、KT 橋に対するコンクリートコア試験に基づく推定余寿命の平均値は両スパンともほぼ同じ推定値となることが分かる。一方、SK 橋の場合、BREX システムによる推定余寿命とコンクリートコアおよび主桁切断面試験に基づく推定余寿命には差異がみられた(ここで下

表-5 SK 橋主桁切断面での中性化深さ測定結果(平均値)と余寿命推定結果のまとめ

スパン	番号	主桁記号(図-3参照)	海側					下面側					山側				
			かぶり厚さの平均値(実測)(mm)	中性化深さの平均値(実測)(mm)	ひび割れ発生年数 $t_{cr}$ (年) $Q_x=10\text{mg}/\text{cm}^2$	耐用年数 $t_{inf}$ (年) $Q_x=75\text{mg}/\text{cm}^2$	推定余寿命 $R_L$ (年)	かぶり厚さの平均値(実測)(mm)	中性化深さの平均値(実測)(mm)	ひび割れ発生年数 $t_{cr}$ (年) $Q_x=10\text{mg}/\text{cm}^2$	耐用年数 $t_{inf}$ (年) $Q_x=75\text{mg}/\text{cm}^2$	推定余寿命 $R_L$ (年)	かぶり厚さの平均値(実測)(mm)	中性化深さの平均値(実測)(mm)	ひび割れ発生年数 $t_{cr}$ (年) $Q_x=10\text{mg}/\text{cm}^2$	耐用年数 $t_{inf}$ (年) $Q_x=75\text{mg}/\text{cm}^2$	推定余寿命 $R_L$ (年)
Span 1	1	G1	56.44	65.49	52.1	72.8	0.8	49.06	27.39	131.9	217.7	145.7	51.25	58.76	43.5	64.6	-7.4
	2	G2	68.33	51.57	97.5	116.8	44.8	55.35	38.71	98.9	135.2	63.2	61.05	49.25	94.3	112.1	40.1
	3	G3	47.17	61.05	28.9	41.9	-30.1	54.92	49.68	55.0	88.0	16.0	50.38	64.90	31.7	47.0	-25.0
	4	G4	52.83	75.15	28.5	48.4	-23.6	52.58	63.19	49.1	68.0	-4.0	48.72	82.13	21.5	38.4	-33.6
	5	G5	63.41	69.84	25.7	39.3	-32.7	63.41	46.57	77.7	96.2	24.2	68.00	72.13	46.6	63.6	-8.4
平均値			54.74	64.62	46.5	63.8	-8.2	55.06	45.11	82.5	121.0	49.0	55.88	65.43	47.5	65.1	-6.9
Span 3	6	G1	49.79	59.88	42.3	75.6	3.6	45.59	22.29	136.0	147.8	75.8	42.7	55.83	30.3	56.9	-15.1
	7	G2	64.98	62.43	64.8	84.3	12.3	45.82	25.17	196.5	250.8	178.8	49.06	57.78	40.1	58.4	-13.6
	8	G3	40.38	58.36	49.2	79.8	7.8	56.15	43.33	191.6	231.1	159.1	76.81	50.81	177.1	220.4	148.3
	9	G4	82.10	72.02	78.7	123.2	51.2	53.28	50.01	71.6	117.8	45.8	43.63	64.71	34.7	72.5	0.5
	10	G5	59.85	55.72	87.9	133.2	61.2	51.47	43.83	38.0	73.0	1.0	62.96	56.18	43.0	78.0	6.0
平均値			59.42	61.68	64.6	99.2	27.2	50.46	36.93	126.7	164.1	92.1	55.03	57.06	65.0	97.2	25.2

面側は補修済みのため考慮せず)。すなわち、Span 1 では、中性化と塩害の複合による激しい劣化により<sup>7)</sup>、既に耐用年数を過ぎており(-25年、-7.6年)、一方、Span 3 では、BREX システムによる出力結果とほぼ同じくらいの推定値となった。このことから、外観近接目視点検データを用いている BREX システムの推定では、Span 1 のような複合劣化における内部劣化を十分に予測しきれていなかったとも考えられる。この点については目視点検の質の向上やシステム処理上の課題として検討する必要がある。

表-6 余寿命推定結果の比較と BREX システムの検証

橋梁名	スパン	コンクリートコア試験による推定余寿命(平均値)(年)	主桁切断面試験による推定余寿命(平均値)(年)			橋梁劣化診断エキスパートシステム(BREX)による推定余寿命(年)
			海側	下面側	山側	
KT橋	Span A	18	-	-	-	13
	Span B	15	-	-	-	13
SK橋	Span 1	-25	-8.2	49.0	-6.9	13
	Span 3	14	27.2	92.1	25.2	15

## 6. 結論

本研究は、類似の環境条件下で架設後約 70 年に渡って供用された老朽橋 2 橋について、主たる劣化要因の特定やコンクリートコア試験による余寿命推定を検討するとともに、J-BMS RC 版による診断結果の検証を試みたものである。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる：

1) 対象橋梁各部材より採取したコンクリートコア試験の結果を用いて、塩害および中性化による複合劣化を受けた主桁および床版の余寿命推定の内陸橋も含めた汎用的な流れに従って推定余寿命を算出した。その結果、KT 橋の主たる劣化要因は塩化物イオンによる塩害と推定され、余寿命の平均値はそれぞれ Span A で約 18 年、Span B で約 15 年となった。一方、SK 橋の主たる劣化要因は中性化と推定され、余寿命の平均値はそれぞれ Span 1 で約-25年、Span 3 で約 14 年となった。

2) 現地での主桁切断面の実測値から、中性化深さのばらつきやかぶり厚さの影響を考慮して余寿命推定を行った。その結果、コンクリートコア試験による推定値より推定余寿命が少し長い目となった。

3) BREX システムによる対象(老朽)橋梁の余寿命推定

結果は、耐久性の観点からの推定値 BREX システムで評価した対象橋梁について、コンクリートコア試験に基づく実測調査により余寿命推定することを試みた結果、BREX システムで出力された耐久性に関する推定余寿命とほぼ同じ余寿命値が得られた。これにより、塩害および中性化を対象とする劣化に対して BREX システムの余寿命推定が有効となることが検証できたと考える。

謝辞：本研究の実施にあたっては、国土交通省中国地方整備局および山口河川国道事務所の担当者の方々に多大なご協力とご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 小林一輔：コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法，森北出版，2001.12.
- 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)，1998.3.
- 浅野寛元：コンクリート橋維持管理支援システム(J-BMS)の再構築と実橋への適用，博士学位論文，山口大学大学院理工学研究科，2015.3.
- 高橋 順，江本久雄，Ratna Widyawati，宮本文穂：コンクリートコア試験による老朽化橋梁の余寿命推定に関する検討，コンクリート工学年次大会論文集，36(2)，2014.7.
- 高橋 順，江本久雄，宮本文穂：老朽 RC 橋撤去時の主桁切断面での中性化試験と余寿命推定，コンクリート工学年次大会論文集，38(2)，2016.
- 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(RCES)，15，2011.3.
- 宮本文穂，江本久雄，高橋順，矢部明人：現地調査に基づく撤去橋梁の健康診断と余寿命推定およびその検証法，社会基盤マネジメントシリーズ No.22，山口大学安全環境研究センター(RCES)，22，2015.3.
- 飯島 亨，佐々木孝彦，横田 優，松島 学：塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究，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，4，2004.10.
- 喜多達夫：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「中性化」，技報堂出版，1986.
- 宮本文穂，浅野寛元，江本久雄，住居孝紀：J-BMS RC 版の開発経緯と実橋梁での検証結果，社会基盤マネジメントシリーズ No.21，RCES，21，2015.3.
- 古賀 裕久，青山 尚，渡辺 博志，木村 嘉富：表面含浸材のコンクリート含水率抑制効果に関する屋外暴露試験，コンクリート工学年次論文集，31(1)，2009.7.