## 論文 老朽橋余寿命推定に必要なコンクリートコア採取本数に関する考察

#### 宮本 文穂\*1・本下 稔\*2

要旨:老朽橋の架け替えを検討する場合,耐久性評価の根幹となる余寿命推定が必要となる。本論文では、 架設後70年以上経過して撤去されることが決定した老朽橋を対象として、解体時に切断した主桁断面の外観 調査および中性化試験を行うとともに,別途実施した主桁各部位から採取したコンクリートコアによる中性 化試験結果との比較を行った。また,両者の試験結果を利用して,中性化と塩害の複合劣化が考えられる対 象橋梁の余寿命推定を行い,この比較結果よりコンクリートコア試験を利用した余寿命推定の信頼性を確保 できる必要コア採取本数を考察した結果を述べる。

キーワード:老朽橋,余寿命推定,主桁切断面,コンクリートコア試験,中性化深さ,塩化物イオン

#### 1. はじめに

既存橋梁の維持管理計画策定においては、老朽化による撤去・架け替えという判断も選択肢の一つになると考えられる。このような判断を実行する場合には、適切な 健全度評価および余寿命推定<sup>1),2),3)</sup>が重要になる。

本研究では,架設(供用)後約70年を経過して架け替え が決まった老朽橋(鉄筋コンクリート(RC)橋)の解体・撤 去時に主桁および床板の各部位から採取したコンクリー トコアを利用した中性化および塩分量試験,ならびに主 桁切断面の外観調査および中性化試験を実施し、両者の 比較より耐久性の観点から健全度の評価を試みた。また, 両者の試験結果を利用して,中性化と塩害の複合劣化が 考えられる場合の余寿命推定フロー<sup>4),5)</sup>に従った対象橋 の余寿命推定を試みた。ここでは,両者の比較結果より, 一般的なコンクリートコア試験を利用した橋梁全体の余 寿命推定の信頼性を確保するための必要コア採取本数を 考察した結果を述べる。

# 対象橋梁の概要と解体時主桁切断およびコンクリートコア採取

#### 2.1 調査橋梁の諸元など<sup>5)</sup>

実橋梁(以下, SK 橋)の各部位からコンクリートコアを 採取して,耐久性の観点から健全度(劣化)評価を行った。 SK 橋は,1941年架設の橋長168.3m,径間数8,全幅員 11mのゲルバーヒンジRC-T桁橋で,供用後約70年を経 て2013年から撤去工事が始まった老朽橋である。SK 橋 は国道2号の幹線に架設された橋梁で,交通量の多さか らコンクリートの中性化が懸念された。また,SK 橋は 瀬戸内海に流入する河口から1.0km以内の位置にあるた め塩害劣化も懸念される環境にある。対象橋梁(SK 橋) の形状・寸法,構造諸元などを,それぞれ図-1 および 表-1に示す。なお,過去の調査<sup>3),4)</sup>および種々の検討結



図-1 SK 橋の側面図および平面図 (撤去前)と 調査対象スパン (Span1 および Span3)

表-1 SK 橋の構造諸元など

橋梁名	SK橋		
路線名	一般国道2号		
架設年	1941年		
橋長	168.29 m		
幅員	11.0 m		
径間数	8径間		
主桁構造	ゲルバーRCT桁		
主桁本数	5本		
床板構造	RC床板		
大型車交通量	6,900台/日		
地域区分	海岸地域(約1km)		

果より,SK橋の主たる劣化要因は中性化と推測された。

#### 2.2 解体時主桁切断およびコンクリートコア採取

SK 橋は, 解体・撤去にあたって, 主桁切断はワイヤ ーソー工法により実施された。図-2,3は,一例として, スパン1の主桁切断位置(青および緑線;計49か所)お よび主桁切断面の例と中性化の様子をそれぞれ示したも のであり、調査対象スパン1およびスパン3で総計116 ブロック(スパン3は67か所)に分割して, スパン端部の ブロックに関しては切断両面, その他は切断片面のみを 調査対象とした。

\*1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) \*2 M.P.E. OFFICE 代表 技術士(建設),博士(工学)

主桁切断と並行して,調 査対象2スパン分の主桁各 位置からコンクリートコア の採取を行った。採取位置 を,一例としてスパン3の 場合について図-4の展開 図の中に●および○印で示 す(切断面との位置関係を 示すため, 図-2 中にも丸 印を付している)。また,図 -5 は、主桁からのコンク リートコア採取位置を 3D 画像上に表示したものであ る(図中の赤丸印)。各スパ ンの横桁を目安に分割した 4 領域でコンクリートコア を採取し、コンクリートの 内部劣化状態を調査した。



図-2 SK 橋スパン1の主桁切断位置(青および緑線)とブロック番号

の平均的な内部劣化状態を示すものと仮定して以下の検 討を行った。採取したコンクリートコアでは、塩化物イ オンの測定(図-4中のCシリーズ)と中性化試験および 機械特性試験(図-4中のMシリーズ)を行うこととした。

## 3. 試験内容と方法

#### 3.1 中性化深さの測定<sup>6)</sup>

なお,採取コアは当該領域

中性化深さの測定は、主桁切断面およびコンクリート コア両方に対して JIS A 1152「コンクリートの中性化深 さの測定方法」に準拠した。コンクリートコアでの計測 数は1周あたり10点とし、この平均値とばらつきを算出 した。主桁切断面の観察面では、切断面のグラインダー 掛け清掃を行い、フェノールフタレイン1%溶液により 赤紫色に抵触した部分までを中性化深さとして、ノギス により計測した。主桁切断面の中性化の状態を図-3(前 載)に示す。

3.2 塩化物イオン濃度の分析<sup>1),3)</sup>(コンクリートコアのみ) 採取した C シリーズのコンクリートコア(図-4 参照) について,深さ方向で 0~105mm の範囲を 7 分割(15mm 間隔に切断)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)に従い,初期塩分量が測定できる 深さまでを調べた。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<sup>3),5)</sup>。

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





図-4 コンクリートコア採取位置(SK 橋スパン 3)

ン濃度, C<sub>0</sub>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, C<sub>i</sub>(x,0)はコンクリ ート中の初期塩分量である。



図-5 主桁内コンクリートコア採取位置の例

## 4. 試験結果および余寿命推定結果と考察

4.1 主桁切断面における中性化深さ(図-3参照)

主桁切断面における中性化深さの計測では, コンクリ ートコアとの比較のためにコアを採取する主桁側面につ いて 10 点以上の計測を行った。その結果, 主桁側面の中 性化深さにはかなりばらつきがあることが判明した<sup>3),4)</sup>。 そこで各側面での値のばらつき状態について変動係数, η

(標準偏差/平均値)を指標として計測値を整理した。 スパン 1 およびスパン3の主桁切断面の下流(海)側と上流(山)側の側面で中性化深さの $\eta$ を比較した結果を図-6 に示す。これより、①スパン1はスパン3に比べ $\eta$ が小 さい、②主桁1、5は $\eta$ が小さい、③スパン3の主桁3,4 は $\eta$ が大きい、などの傾向があることがわかる。

次に、主桁側面を Lower (下面側), Upper (床版側), Middle (その中間)の3つの部分にわけて、両側面での 中性化深さの相関を整理した。その結果を図-7に示す。 これより、一般的に主桁側面の上部 (床版に近い部分)



図-6 各主桁切断面での中性化深さの変動係数比較

しています。 してい

図-7 主桁切断面を高さ方向に3分割した場合の相関

では桁両面の中性化の相関が他の部位に比べて低くなる 傾向がわかり、特に、Girder(主桁)3のように「ほとんど 相関がない」場合もみられた。したがって、コンクリー トコアにより中性化試験の結果を評価する場合は、コア を採取する位置の影響も考慮して行う必要があると考え られる。

以下, 主桁切断面での面的な中性化深さとコンクリー トコアによるポイントでの中性化深さを比較することに よって, コンクリートコアの中性化深さの値が, 主桁全 体の値を代表することの妥当性を検討してみる。

#### 4.2 主桁切断面とコンクリートコアの中性化深さの比較

主桁切断面における側面の中性化深さの分布と主桁 側面から採取したコンクリートコア試験による各コアの 中性化深さの分布とを正規分布と仮定して比較した結果 を図-8に示す。これより、切断面での中性化の平均(中 央)値は65mmで、コア試験による中性化の平均(中央)値 54mmより20%程度大きいことがわかる。

#### 4.3 コア採取位置近傍の切断面の中性化深さとの比較

コアの採取位置に近い主桁切断面の中性化深さの平



図-8 各主桁切断面およびコンクリートコア試験で の中性化深さの分布比較



均値( $X_2$ )と、コア試験による中性化深さの平均値( $X_1$ )を比 較した。その結果を図-9に示す。ここで、X<sub>1</sub>とX<sub>2</sub>のデ ータの相関関係をみると、図中に示す $X_2=1.2 \cdot X_1$ の補助 線に近い傾向がみられた。これより、前述同様、コア採 取位置近傍での比較でも主桁切断面内の中性化深さはコ ア試験より20%程度大きいことがわかる。

## 4.4 コアを採取する主桁両側面での比較

コンクリートコアを主桁側面から採取する方向(海側 から、山側から)の影響について、主桁切断面の中性化 深さをもとに検討した。主桁切断面の両側で中性化深さ の相関を調べた結果を表-2 に示す。表-2 はスパン 1 およびスパン3を併せた各主桁両側面での中性化深さ の相関係数で、()内の数値は中性化深さを四捨五入し て 10mm 単位の値で相関をみた場合である。相関係数で は、「0~0.2:ほとんど相関がない、0.2~0.4:やや相関 関係がある, 0.4~0.7: かなり相関関係がある, 0.7~1.0:

表-2 主桁切断面の両側での中性化深さの相関比較

主桁番号	相関係数	サンプル数
Girder 1	0.273 (0.356)	248
Girder 2	0.388 (0.389)	317
Girder 3	0.191 (0.241)	300
Girder 4	0.423 (0.428)	314
Girder 5	0.432 (0.434)	241



図-10 主桁切断面での典型的な中性化深さ分布



図-11 切断面中性化深さの平均値と標準偏差の分布

強い相関関係がある」が一般的解釈である。両側面の比 較では表-2 に示すようにサンプル数が充分なので上記 の解釈でよいと考えられる。したがって、主桁両側面の 相関は、やや相関がある程度と考えられる。

## 4.5 コアを採取する主桁側面の高さ方向での比較

主桁切断面での典型的な中性化深さ分布の一例を図 -10 に示す。図-10(a)は分布(ばらつき)の大きい場合, 図-10(b)は平均的な分布である。コンクリートコア試験 での一般的な採取径は φ100mm なので, 図-10(a)のよう な場合(図の一目盛は 50mm), コンクリートコアを採取す る場所によってばらつきが大きい結果になることが予想 される。また、主桁切断面での中性化深さの計測値の平 均値と標準偏差の関係を図-11に示す。これより平均値 が大きい場合には標準偏差が大きい、すなわち、ばらつ きが大きくなる(図-10(a)に類似した分布)ことがわか る。そこで, 主桁の高さ方向に3分割(底面側, 中間部, 床版側)したそれぞれの部分における両側面の相関係数 を調べた。その結果は前載図-7 に示す通りであり、橋 軸直角方向の中央にある主桁 (Girder 3) では両側面の中 性化深さの相関性は低く,特に主桁上部(床版側)では ほとんど相関が見られないことがわかった。したがって, 中性化試験のコンクリートコアを採取する場合はできる だけ主桁側面(上下)中央付近とし、橋軸直角方向の中央 にある主桁では採取する側面のばらつきに左右されない ように試験体数を増やすなどの配慮が必要と考えられる。

## 4.6 両者による余寿命推定結果と考察

主桁切断面の調査およびコンクリートコア試験の両者 から得られた中性化深さのデータを基に SK 橋の余寿命 を推定し、その比較結果からコアの必要本数など種々の 考察を行った。コンクリート構造物の寿命予測は、「鉄筋 腐食による断面欠損を放置した場合における構造物の余 寿命を予測するもの」<sup>7)</sup>で、「放っておいたら、あと何年」 という年数の推定になる。したがって、余寿命 R は、寿 命と判断された*t*年と供用年Nから次式で算出される:

$$余寿命 R = 寿命 t - 供用年 N (2)$$

ここで、寿命推定を行う方法としては、許容応力度 による評価,鉄筋残存率による評価,限界状態設計法 による評価などがあるが、本研究では文献3)、4)およ び 5)で特定した劣化因子である中性化に起因した経 時的な劣化進行によって評価する。すなわち、中性化 による劣化は水分や塩化物イオンなどの鉄筋を腐食さ せる因子の影響を左右する環境(雰囲気)を提供するも のと考え,中性化範囲の広がりによる累積鉄筋腐食量 に着目し、その累積鉄筋腐食量が限界値Qimitに至った 時を寿命 t と定義した。そして、得られた寿命 t を用 いて、式(2)より余寿命 Rを推定した。





耒

図-12 に、主たる劣化要因として「塩害」を考えた 場合(左側の流れ)と「中性化」(右側の流れ)を考えた場 合の余寿命推定のフロー<sup>4),5)</sup>を示す。図-12 のフローで はコンクリートコア調査時の中性化残りが10mm以下の 場合に主たる劣化要因を中性化とし劣化評価を進めてい くことになるが、ここで寿命 (年の推定のため、中性化 深さの推定,鉄筋腐食量の推定,寿命を仮定するための 限界累積鉄筋腐食量Qiimitの設定という3つの情報が必要 となる。ここで,寿命推定時に仮定する限界累積鉄筋腐 食量 Q<sub>limit</sub> に関しては, 既往の報告<sup>8)</sup>では評価基準 Q が 1 ~576 mg/cm<sup>2</sup>と幅のある値になっている。また,橋梁劣 化診断エキスパートシステム(BREX)での余寿命推定は, 目視点検結果をもとに得られる健全度評価点に劣化曲線 を適用して行われるが、余寿命推定時の限界累積鉄筋腐 食量 Q<sub>limit</sub>を 75 mg/cm<sup>2</sup>とすることが示されている<sup>2),9),10)</sup>。 そこで、本研究では、評価基準 Q を、余寿命推定時に限 界累積鉄筋腐食量=75 mg/cm<sup>2</sup> とした場合について、図 -12の右側フローに従った余寿命推定を行った。なお, ここでは、C シリーズのコンクリートコア試験で得られ た塩化物イオンの拡散係数、イオン濃度を主桁切断面調 査およびコア試験の両者に適用して余寿命推定を行った。

表-3 は、各主桁のコンクリートコア採取位置を含む 主桁切断ブロックのデータ(コア採取位置近傍の切断面) を基に、両者による余寿命推定結果をまとめたものであ る。また、図-13 は、両者による余寿命推定結果の相関 を図示したものであり、かなりの相関性(相関係数:約 0.6)を有することが分かる。

一方, 表-4 および図-14 は, 各主桁で基本的に 3 か

を一3 コア採取位直近傍の切断面での余寿命推定結果比較
-----------------------------

	主桁番号	コンクリート	橋齢72年における推定余寿命(年)		切断ブロック番号**		
スハシ名		コア番号*	コンクリートコア	主桁切断面	広島側	山口側	位置
	Girder 1	C1014	-30	0	H-16-Y	H-21-Y	山側
		C1111	15	39	H-1-Y	H-6-Y	海側
		C1115	-23	-27	H-21-Y	H-26-Y	海側
	Girder 2	C2113	-17	44	H-18-Y	H-22-Y	海側
		C3011	-22	-51	H-3-Y	H-8-Y	山側
スパン1	Girder 3	C3015	-42	-31	H-32-Y	H-36-Y	山側
		C3114	-34	-42	H-28-Y	H-32-Y	海側
	Girder 4	C4113	-31	-26	H-20-Y	H-29-Y	海側
	Girder 5	C5111	-23	-53	H-5-Y	H-10-Y	海側
		C5114	-24	-42	H-17-Y	H-25-Y	海側
		C5115	-23	-33	H-25-Y	H-30-Y	海側
スパン 3	Girder 1	C1131	-11	-12	H-50-Y	H-55-Y	海側
		C1134	1	10	H-65-Y	H-70-Y	海側
		C1138	17	-14	H-88-Y	H-93-Y	海側
	Girder 2	C2031	-3	-21	H-56-Y	H-61-Y	山側
		C2136	-20	-5	H-84-Y	H-89-Y	海側
	Girder 3	C3134	13	-44	H-77-Y	H-81-Y	海側
		C3138	38	1	H-99-Y	H-103Y	海側
	0.1	C4031	2	-36	H-58-Y	H-63-Y	山側
	Girder 4	C4136	42	55	H-86-Y	H-91-Y	海側
	Girder 5	C5031	3	53	H-54-Y	H-59-Y	山側
		C5038	60	50	H-92-Y	H-97-Y	山側
		C5134	19	98	H-69-Y	H-74-Y	海側
	0.44007	·	** 57 0.4 17				

注)\*:図-2,4参照,\*\*:図-2参照,\*\*\*:図-3参照

所(3 本)以上の平均値を当該主桁の代表値として余寿命 を推定し,余寿命およびそれらの相関を主桁面方向(山側, 下面側,海側)別にまとめたものである。なお,当主桁が 架設後のある時期にライニング補修が施工されているた め,図-14中では主桁下面での余寿命推定結果を除外し た。これより,両者の間には強い相関性(相関係数:約 0.7)が見られることが明らかとなる。

## 5. 結論

本研究は、供用後約70年経過した老朽橋(SK橋; RC 橋)の解体時に、主桁切断面の面的な中性化試験およびコ ンクリートコアによる中性化試験を行い、両試験結果に 基づく余寿命推定結果を比較するとともに、余寿命推定 の信頼性確保が可能なコンクリートコア本数を検討した ものである。その結果、以下の結論が得られた:



表-4 主桁ごとの平均的な余寿命推定結果比較

	主桁番号	推定余寿命(年)					
スパン名		海側		下面側		山側	
		コンクリート コア	主桁 切断面	コンクリート コア	主桁 切断面	コンクリート コア	主桁 切断面
スパン 1	Girder 1	-4	0	-	145	-30	-8
	Girder 2	-17	44	-	63	-	40
	Girder 3	-34	-31	-	16	-32	-25
	Girder 4	-31	-24	-	-4	-	-34
	Girder 5	-23	-33	-	24	-	-9
スパン 3	Girder 1	3	3	-	75	-	-16
	Girder 2	-20	12	-	178	-3	-14
	Girder 3	25	71	-	159	-	148
	Girder 4	22	51	-	45	-	0
	Girder 5	19	61	-	58	20	11



#### 図-14 各主桁間での推定余寿命比較

対象橋の2スパン(スパン1およびスパン3)にわたり、それぞれ49断面と67断面で(計116断面)で、主桁断面の中性化深さの分布やかぶり厚さを調べた。その結果、主桁断面における中性化深さの平均値はコンクリー

トコア試験の中性化深さより20%程度大きくなる傾向が 明らかとなった。

2) RC-BREX<sup>10</sup>との対応から得られた限界累積鉄筋腐 食量 Q<sub>limit</sub>=75 mg/cm<sup>2</sup>を用いて、中性化および塩害の複 合劣化を考慮した主桁の余寿命推定のフローによる両試 験結果を用いた余寿命推定結果にはかなりの相関がみら れた。これより、老朽橋から採取するコンクリートコア による余寿命推定の信頼性を確保するためには、測定対 象のばらつきを考慮してコンクリートコア試験体数を各 主桁で少なくとも3本以上とすることが望ましい(図-2 および図-4参照)。

謝辞:本研究の実施にあたって種々ご協力頂いた,国土交 通省中国地方整備局山口河川国道事務所の担当者の方々 および電気化学工業(株) デンカイノベーションセンタ 一先端技術研究所,高橋 順氏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.
- 2) 宮本文穂,江本久雄,高橋順,平西邦裕: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,コンクリート工学論文集,23(3),pp. 119-132,2012.9.
- 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), pp. 1339-1344, 2014.
- Ratna Widyawati, Ayaho Miyamoto, Hisao Emoto and Jun Takahashi: Service Life Prediction of an Aged Bridge based on Carbonation Tests of Cross-Section Cutting-Off Girders, 材料, 64(10), 日本材料学会, pp. 835-842, 2015.10.
- 5) 高橋順,江本久雄,宮本文穂:老朽RC 橋撤去時の 主桁切断面試験に基づく余寿命推定と検証,コンク リート工学年次論文集,38(2),pp.1549-1554,2016.
- 6) 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.
- 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, 土木学会,コンクリート技術シリーズ 71,2006.
- コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研 究小委員会委員会報告書, 土木学会, 2009.
- 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.
- 宮本文穂,浅野寛元: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, コンクリート工学年次大会論文集,40(2),pp. 1399-1404,2018.