

論文 老朽 RC 橋撤去時の主桁切断面の中性化試験と余寿命推定

高橋 順*1・江本 久雄*2・宮本 文穂*3

要旨：本研究は、架替えが決まった老朽橋梁の撤去時に切出された主桁切断面の調査に基づくものである。主桁切断面の評価では、各断面の中性化深さをもとに主桁側面内での分布を表示する手法を検討し、対象橋梁の主桁側面では主たる劣化要因が中性化であること、中性化は内側の主桁で大きい傾向がみられることなどがわかった。余寿命推定では、対象橋梁が海岸線近くに存在したため塩害劣化の影響も考えられることから、塩害と中性化の影響を考慮した余寿命推定の流れを提案した。これに従って余寿命推定を行うとともに、コンクリートコア試験による推定結果との比較も行った。

キーワード：RC-T 桁橋, 老朽橋梁, 主桁切断, 中性化試験, 塩害, 累積腐食量, 余寿命推定

1. はじめに

急速な高齢化が進む既存橋梁の健康診断や余寿命推定を定量的に行う手法の開発が急務となってきた。著者らは、老朽 RC 橋の健康診断や余寿命推定を Bridge Management System (BMS) により診断する検討を行っている^{1),2)}。BMS では、コンクリート表面に顕在化した劣化・損傷などの変状データといった近接目視点検結果を入力データとするため、専門家の知識や経験の量・質が大きく影響する³⁾。そこで著者らは、コンクリートコア試験により BMS の結果を検証するなどの検討も行ったが、コンクリートコア試験は対象橋梁の限られた部位からの少量採取であるため、橋梁全体の余寿命推定を定量的に把握することが難しいなどの課題もわかってきた^{2),3)}。

そこで本研究では、供用後約 72 年を経た老朽 RC 橋梁の主桁断面の中性化試験により、余寿命の評価因子である劣化の-span 全体の分布評価を行った。これは離散的なデータである主桁切断面の中性化試験の結果を主桁全体の連続データとなるように関数化し、これを用いて-span 全体の中性化深さ分布を可視化して評価するものである。劣化状態が連続関数として表されることで「3D 画像を利用した橋梁目視点検支援システム」¹⁾への組み込みが可能になるため、点検者の学習に活用が期待できる。また、コンクリートコア試験の部分的な評価を全体評価に拡張し、全体評価である BMS の結果を定量的・統計的

に裏付けをする際に活用できると考えられる。

2. 対象とした老朽 RC 橋の概要と解体・撤去方法

2.1 老朽 RC 橋の概要

対象とした老朽 RC 橋(SK 橋)の主要な橋梁諸元を表-1 に示す。SK 橋は、橋長 168m、径間数 8、ゲルバーRC-T 桁橋で、主桁本数は 5 本である。本橋は、海岸地域とされる交通量の多い幹線に架設されていることもあり劣化、損傷の進行が大きく、ゲルバーヒンジ部の補強および主桁下面の樹脂材による補修を経て、架設後約 72 年目で解体・撤去後の架替えが判断された。図-1 に、対象橋梁撤去前の側面および平面図、今回対象とした調査-span (2 span: 端span と 3 番目のspan) の位置を示す。

表-1 対象橋梁(SK 橋)の構造諸元

橋梁名	一般国道 2 号 SK 橋
橋長	L = 168.29 m
幅員	W = 11.0 m (2 車線 + 歩道) W = 2.5 m (歩道)
上部構造	ゲルバーRC-T 桁橋
下部構造	橋台: 2 基 橋脚: ラーメン橋脚(RC) : 7 基
基礎構造	橋台: 松杭 橋脚: オープンケーソン
架設年次	1941 年(昭和 16 年)
交通量(H22)	28,281 台/日

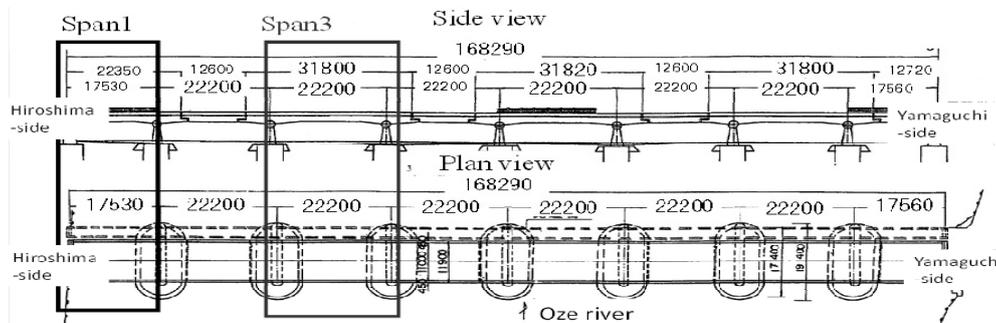


図-1 対象橋梁(SK 橋)の側面図および平面図(撤去前)と調査区間

*1 デンカ株式会社 先進技術研究所 博士(工学) (正会員)

*2 (株) 構造物クリニック 博士(工学) (正会員)

*3 山口大学 名誉教授 工博 (正会員)



図-2 ワイヤソーによる主桁切断と吊り上げ状況

2.2 解体・撤去工法と断面切断箇所

SK 橋の解体・撤去は、ワイヤソーによって床版、主桁および橋脚を所定の重量になるように切断され、総計 116 ブロックに分割して搬出された。図-2 は、ワイヤソーによって主桁を切断して大型クレーンで切断ブロックを吊り上げている状況を示している。なお、各主桁の切断位置は図-6 (青線) に示す。

3. 主桁断面の中性化評価

3.1 実験方法⁴⁾

2011 年度から 2 年間で解体・撤去された SK 橋 Span 1 および Span 3 の主桁切断ブロック両端断面を利用して、中性化深さおよびかぶりの計測を実施した。切断後の主桁断面にはコンクリート粉など残差物が付着するため、サンダー処理と表面清掃を施した。清掃直後の切断面の一例を図-3(a)、かぶり計測および中性化試験を行った断面の一例を図-3(b) にそれぞれ示す。ここで、中性化試験は、清掃した切断面にフェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧して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する方法で行った。計測は主桁断面の下流側 (海側)、上流側 (山側) の両側面および主桁下面の中性化深さを約 10cm 間隔で計測した。

3.2 実験結果

Span 1, Span 3 における主桁(G1~G5)断面での中性化深さの計測結果を図-4, 図-5 に示す⁵⁾。また、各スパンの主桁断面でのかぶり計測値の分布を図に併記する⁵⁾。

中性化深さは主桁両側面 (○) と主桁下面 (●) に分けて表示した。主桁下面では樹脂材による断面修復の補修箇所が多くみられ、Span 1 の G1, Span 3 の G1, G2 では、特に主桁側面に比べ中性化深さが小さい傾向がみられた。一方、主桁側面の中性化深さの平均値は、中性化深さの限界値 (= かぶり - 10mm) を大きく超える結果となった。この傾向は、Span 1 でも Span 3 でも同様であった。このことから、対象橋梁では中性化が劣化要因の一つであると推察できる。

Span 1 において各主桁の中性化深さを比較すると上流側の主桁 G4, G5 が大きい傾向がみられる。Span 3 では主桁による中性化深さの違いはあまりみられないが、主桁

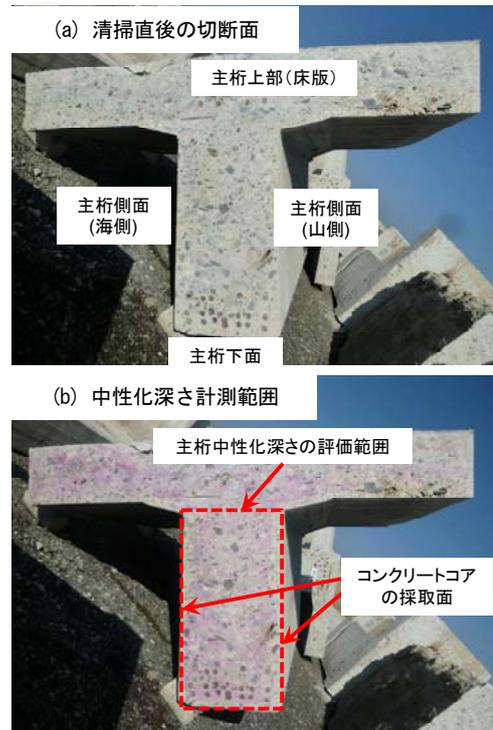


図-3 主桁切断面の処理と中性化深さなどの計測⁴⁾

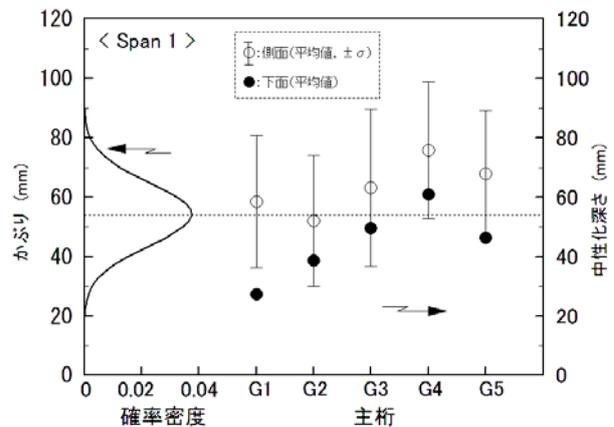


図-4 Span 1 での主桁の中性化深さとかぶり⁵⁾

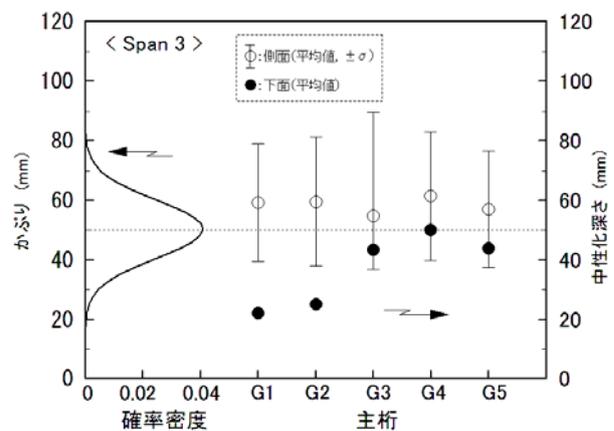


図-5 Span 3 での主桁の中性化深さとかぶり⁵⁾

下面では上流側ほど大きい傾向がみられる。また、主桁下面については Span 1 でも同様の傾向がみられる。

3.3 考察

(1) 主桁側面での中性化深さの分布

中性化深さの計測値をもとに、主桁側面での中性化深さの分布傾向を調べる。はじめに、主桁断面の橋軸方向

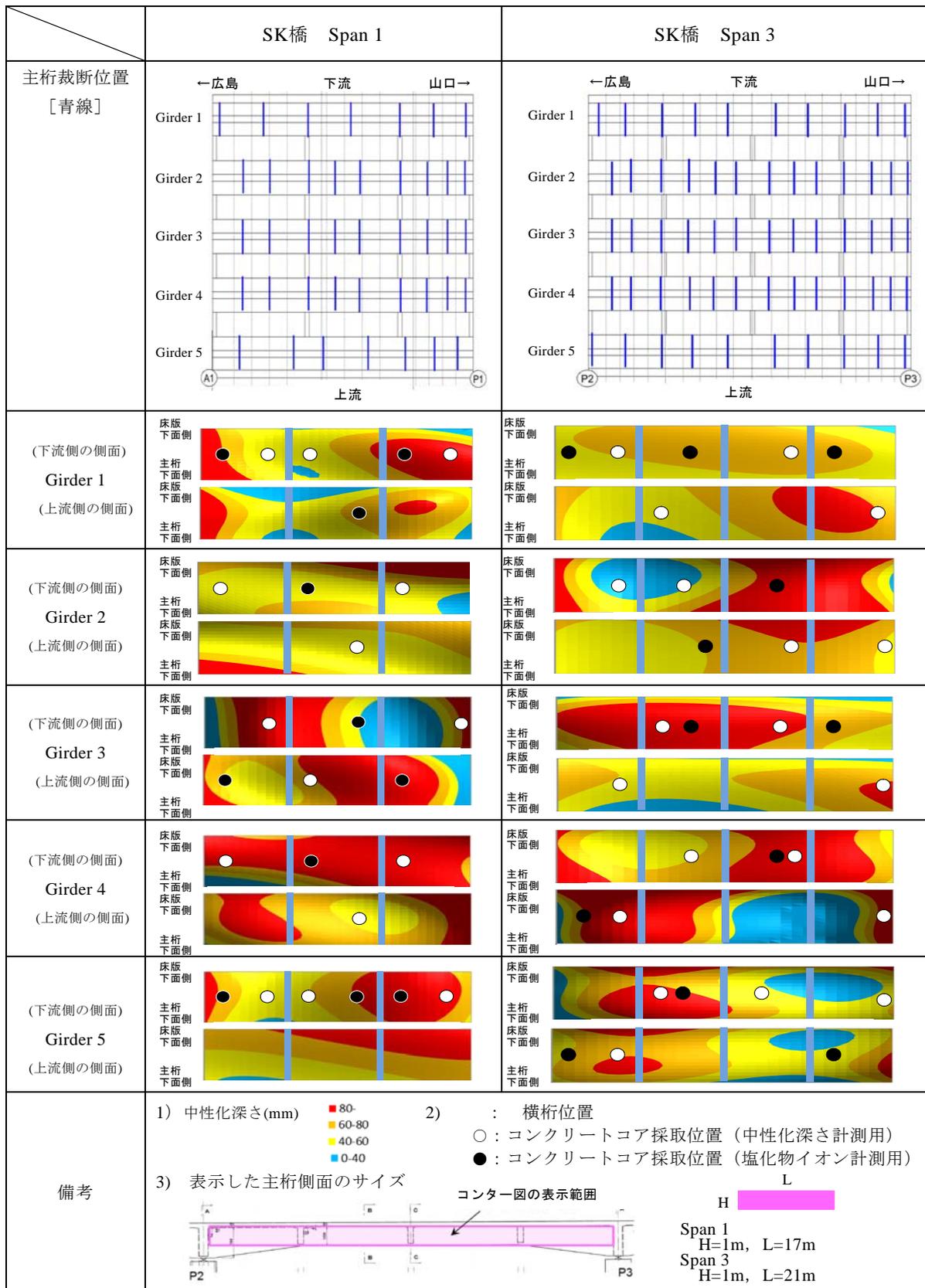


図-6 主桁切断位置および主桁各側面における中性化深さのマッピング図

位置(y)および主桁高さ方向の位置(x)における中性化深さ t_c を次式のような2変数3次関数で表す。

$$t_c = a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fx^3 + gy^3 + hx^2y + ixy^2 \quad (1)$$

式(1)は位置 (x, y) での中性化深さの実測値を用いて、桁側面での中性化分布を求めようとするものである。式(1)のような3次関数であれば、未知の係数もさほど多くなく、ある程度の複雑な分布でも表示できると考えられる。手法としては、離散的な実測値をもとに、式(1)の a から i の9つの係数を最小二乗法により求め、連続関数である式(1)を確定することになる。そして式(1)が主桁各面での中性化深さ t_c を表す近似関数となる。連続的な値として求まる近似関数を用いて、各主桁側面での中性化深さの分布を可視化データとしてコンター表示ができる。

結果を図-6に示す。ここで、中性化が影響する目安となる中性化残りを10mm、対象スパンでのかぶりが約50mmであることを考えると、図-6で中性化深さが40mm以下の場合(青の領域)は中性化の影響が小さいと考えることができる。図-6では各主桁面で青色の部分がかつてところどころ見られるが比率としては小さい。このことから、劣化要因としては中性化の影響が大きいと推察できる。Span 1, Span 3での中性化深さの面内での分布をみると、①主桁 G3, G4に中性化深さの大きい部分が広く見られる、②橋軸方向での中性化深さの分布は各面により異なりスパン全体としての傾向はみられない、③桁の高さ方向で中性化深さに違いがみられる⁶⁾主桁面がある、ということがわかった。

次に、各主桁の両側面での中性化深さを比較する。結果を図-7に示す。図は、各主桁で近似関数から得られる下流側の面での中性化深さと上流側の面での中性化深さの差をマッピング表示したものである。両面の差は絶対値で表され、青は両面の差が10mm以下の部分で両面の差があまりない場合、赤は両面の差が50mm以上の部分で両面の差が大きい場合を示している。図より、Span 1ではG3, Span 3ではG3, G4の桁で両面の差が大きい部分が多い。これより、コンクリートコア試験で橋軸直角方向の中央付近に位置する桁(G3, G4)からコアを採取する場合は、採取する側面に偏りがあると中性化深さの結果および影響要因の判定に影響することが考えられる。

(2) 断面調査結果とコンクリートコア試験との比較

本研究ではコンクリートコアの採取による中性化試験も行った。そのときのコア採取位置を図-6(○)に示す。図-6に示したような桁側面での中性化深さの分布をみると、コンクリートコア試験では採取位置もパラメータとなりうる事が考えられる。そこで、主桁断面での試験結果とコンクリートコア試験による中性化評価の比較を行う。結果を図-8に示す。ここでは2通りの方法で比較を行った。図の○は、コア試験の結果とコア採取位置に最も近い断面試験の結果、●は3.3(1)で求めた近似式によりコア採取位置での中性化深さを求め、これとコア試験の結果を比較したものである。結果にばらつきはあるものの、どちらの方法による断面試験の結果もコンクリートコア試験の値より20~30%程度大きい中性化深さであった。これは断面試験の結果が桁高さ方向の分布も含んだ平均値であるためと考えられる。

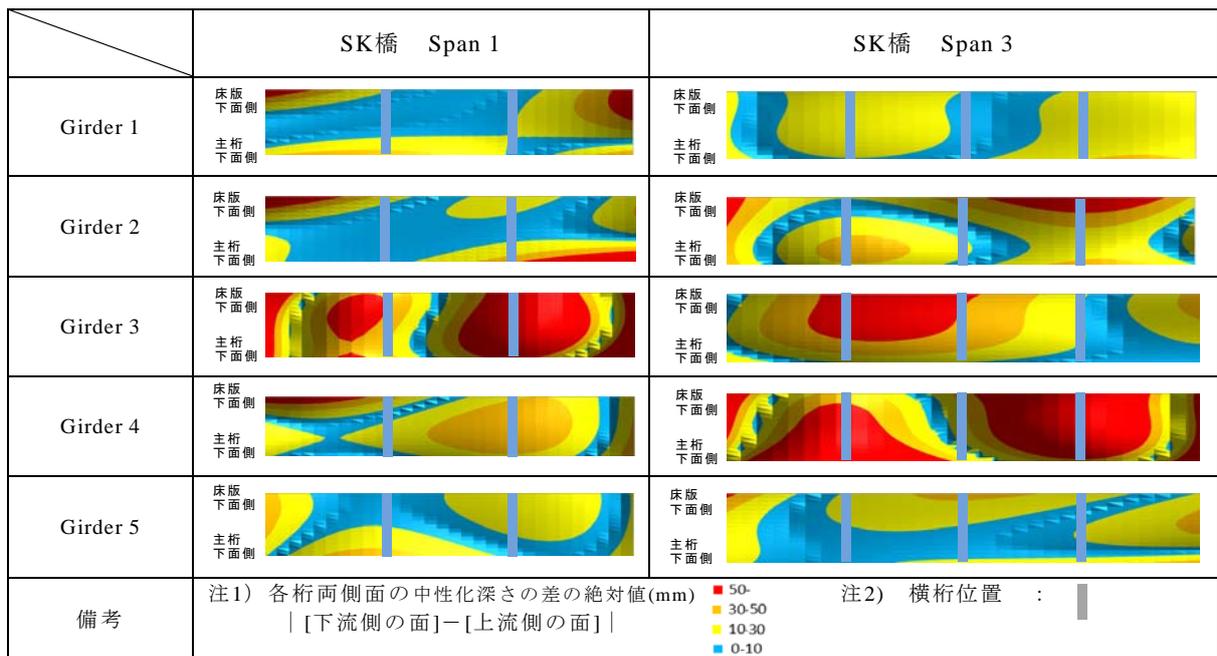


図-7 主桁の下流側側面と上流側側面での中性化深さの差

4. 主析断面の中性化試験に基づく余寿命推定

4.1 推定手法^{2),5)}

劣化要因が中性化と塩害である場合を対象に考える。余寿命推定は図-9のフローに従う。図-9では中性化残りが10mmを越えるかどうかで主たる劣化要因を塩害と中性化に分類して考えている。本研究では、3.で述べたように中性化の影響が大きいので、図-9で中性化残りが10mmに至らない場合で考える。また、図-9のフローで扱う鉄筋の腐食量は条件を仮定した推定値である。

中性化による劣化は、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の算出により評価する。中性化深さの経時的な推定は \sqrt{t} 則に従い、中性化速度係数 A を実測した切断面の中性化深さ $d(t=72)$ を用いて次式から求める。

$$A = \frac{d(t)}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

ここで、中性化残り(=かぶり-中性化深さ)が10mmより大きい場合は式(3)、10mm以下の場合は式(4)によ

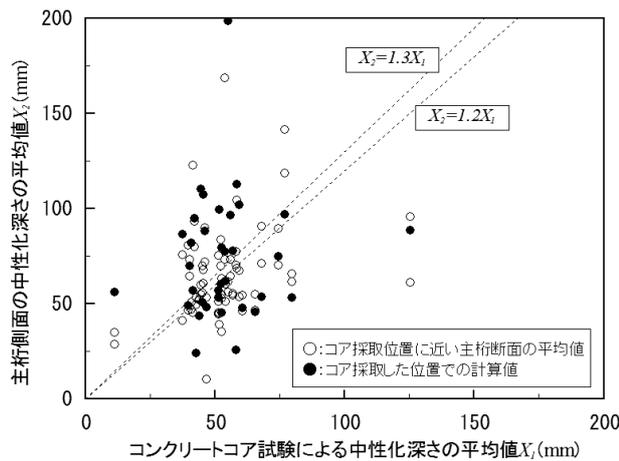


図-8 主析断面試験とコンクリートコア試験の中性化深さの比較

て鉄筋腐食速度 V を求める^{7),8)}。

$$V = 1.32(Cl - 1.2) \times k \quad (3)$$

$$V = (0.840W - 0.145C + 1.32Cl + 0.0293W \cdot C - 0.0917C \cdot Cl + 0.658Cl \cdot W - 2.52) \times k \quad (4)$$

ここで、式(3)および(4)は C, W, Cl をパラメータとした実験式で、 $V(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年})$ は鉄筋腐食速度、 $Cl(\text{kg}/\text{m}^3)$ 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。本検討では W は暴露試験の結果を参考に4%と設定した⁹⁾。 k は気温 $tmp(^\circ\text{C})$ のときの補正式で、次式で求められる。

$$k = 1 + 0.0381 \times (tmp - 20) \quad (5)$$

累積鉄筋腐食量 $Q(t)$ 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。

$$Q(t) = Q_0 + \sum_{t=t_1+dt}^{t=X} \left(\frac{dt}{2} \left(V\left(t - \frac{dt}{2}\right) + V\left(t + \frac{dt}{2}\right) \right) \right) \quad (6)$$

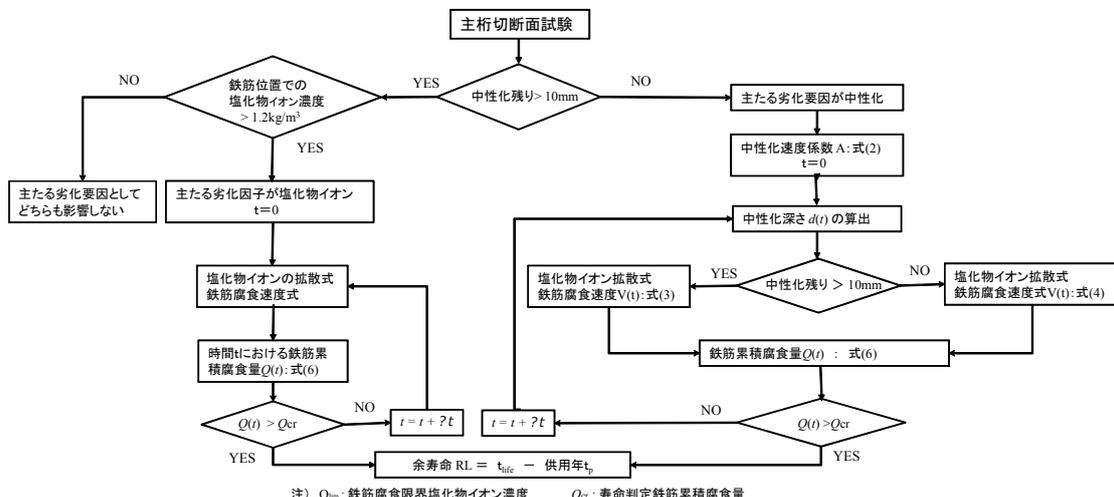
ここで、 t_1 は $V(t_1)=0$ のときの時間で、 Q_0 は次式で表される。ただし、 $t \leq t_1$ の時は $Q_0=0$ とする。

$$Q_0 = \frac{dt}{4} V\left(t_1 + \frac{dt}{2}\right) \quad (7)$$

寿命 t_{life} は累積鉄筋腐食量 $Q(t)$ が寿命を仮定する鉄筋腐食量 Q_{cr} に至ったかどうかで判定される。判定する Q_{cr} は既往の研究結果^{1),10)}から $75\text{mg}/\text{cm}^2$ と設定した。これより余寿命 RL は寿命 t_{life} と供用年 t_p の差として求まる。

4.2 推定結果

SK橋 Span 1, Span 3の余寿命推定を図-9のフローに従って行う。推定は架設後72年に行った調査結果にもとづいたもので、推定に必要な条件を表-2に示す。塩化物イオンの拡散は図-7に示した位置(Span 1は11箇所、



注) Q_{lim} : 鉄筋腐食限界塩化物イオン濃度 Q_{cr} : 寿命判定鉄筋累積腐食量

図-9 主析断面試験による余寿命推定のフロー^{2),4)}

表-2 SK 橋 Span 1, Span 3 の余寿命推定に用いる条件と推定結果

SK 橋	中性化の計測手法	供用年(年)	かぶり(mm)	中性化深さ		塩化物イオンの拡散			推定余寿命(年)
				平均値(mm)	標準偏差(mm)	表面濃度 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	拡散係数 $D(\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s})$	初期濃度 $C_i(\text{kg}/\text{m}^3)$	
Span 1	コア	72	54	55	6.6	1.71	0.60	0.4	0
	断面			65	22				-13
Span 3	コア		50	49	7.7	1.14	0.21	0.3	14
	断面			59	22				0

Span 3 は 12 箇所) から採取したコンクリートコアによるものである。塩化物イオンの分析は JIS A 1154 に従い、その結果から塩化物イオンの拡散にかかわる係数の各スパンでの平均値を求めて用いる^{2),4)}。また、中性化深さについては、主桁断面の試験による場合(図-4, 図-5)とコンクリートコア試験による場合(採取位置: 図-6)を用いる。表-2 をみると、スパンの平均値でも主桁断面試験による中性化深さはコンクリートコア試験による結果より 20%程度大きく、図-8 と同様の結果であった。

表-2 に余寿命の推定結果を示す。この推定値は鉄筋の推定腐食量によるものであるが、実際の鉄筋の腐食状況をみると、鉄筋露出や錆汁などが見られる腐食の激しい部分やコンクリートへの付着が保持されている腐食のない部分などが混在していたため、推定値はこれら鉄筋腐食状況の全体的な評価と考え、図-9 に従った。コンクリートコアによる中性化試験の結果を用いた場合は、Span 1 で 0 年、Span 3 で 14 年の余寿命と推定された。一方、主桁断面試験による中性化の結果を用いた場合は、Span 1 で-13 年、Span 3 で 0 年と、コンクリートコア試験の場合より 10 年程度短い余寿命と推定された。この差は中性化の評価結果の違いによるものである。本研究で示した図-6 のような主桁の中性化分布をみると、余寿命推定では、推定に用いる中性化など劣化にかかわる値などの算出も重要と考えられる。

5. 結論

本研究は、老朽橋梁(供用72年)から切出された主桁切断面の中性化試験を主として、劣化評価と余寿命推定を検討したものである。以下に結果を示す。

- (1) 老朽橋梁の解体・撤去時に主桁切断面(計116ブロック)の中性化試験結果をもとに、主桁での中性化をマッピングする手法を検討し、中性化分布を示した。
- (2) 主桁側面の中性化分布をみると、橋軸直角方向の中央付近に位置する桁内側の主桁(G3,G4)で中性化の大きい部分が広くみられる。このとき、上流側と下流側の側面での中性化深さの差も大きい傾向がみられた。
- (3) 主桁切断面の評価による中性化深さは、コンクリートコア試験による中性化深さより 20%程度大きいことがわかった。このため、余寿命推定でも主桁切断面の

評価結果を用いた場合は、コンクリートコア試験の結果を用いた場合より10年程度短い推定結果となった。

謝辞

本研究の遂行において、老朽RC橋の現地実験の機会を与えていただいた国土交通省中国地方整備局の担当者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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, 第 23 巻第 3 号, pp119-132,2012.9.
- 2) 高橋順, 江本久雄, R. 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論文集, Vol.36, No.2, pp.1339-1344, 2014.7.
- 3) 江本久雄, 高橋 順, 宮本文穂: J-BMS RC 版による老朽化橋梁の余寿命推定に与える目視点検データのばらつき, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1327-1332, 2014.7.
- 4) R.Widyawati, A. Miyamoto, H. Emoto, J. Takahashi: Service Life Prediction of an Aged Bridge Based on Carbonation Tests of Cross-Section Cutting-Off Girders, Jour. of The Society of Materials Science, Vol.64, No.10, pp. 1-8, 2015.10.
- 5) 高橋順, 江本久雄, 宮本文穂: 実橋梁における余寿命推定のための主桁断面観察,九州支部第 1 回学術講演会,B16,2014.12.
- 6) 高橋順, 宮本文穂, 江本久雄: 実橋梁におけるコンクリートコア中性化試験の信頼性, 日本材料学会第 64 期学術講演会講演論文集, 113, pp.24-25, 2015.5.
- 7) 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, 第 4 巻 pp11-16, 2004.10.
- 8) 飯島亨, 工藤輝大, 玉井謙: コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響, 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 8 巻 pp299-304, 2008.10.
- 9) 古賀裕久, 渡辺博志: 屋外に暴露したコンクリートの含水率モニタリング結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.641-646, 2006.7.
- 10) 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.