

論文 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

高橋 順^{*1}・江本 久雄^{*2}・Ratna Widyawati^{*3}・宮本 文穂^{*4}

要旨: 橋梁の長寿命化を図るためには適切な健全度評価に基づく維持管理が必要と考えられる。橋梁健全度の評価手法としては、目視点検結果を情報处理的な手法により解析する健全度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影響の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。そこで本論文では、老朽化橋梁から採取したコンクリートコアの劣化評価を行い、主たる劣化要因が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。

キーワード: 老朽化橋梁, コンクリートコア試験, 余寿命推定, 中性化, 塩化物イオン, 含水率

1. はじめに

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^{1),2),3)}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)」^{4),5)}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)」がこれにあたる。BREX 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。このような情報处理的な手法を用いた場合, 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と考えられる。

そこで本研究では, 老朽化した撤去橋梁(供用 70 年)から採取したコンクリートコア試験の劣化評価を行い, 特に, 中性化による劣化の場合の余寿命推定手法について検討を行う。また, その結果を用いて, コンクリートコア試験による全体評価手法の有効性なども探る。

2. 対象とした橋梁と検討の目的

2.1 対象橋梁

実橋梁(以下, SK 橋)からコンクリートコアを採取して劣化評価を行った。SK 橋は 1942 年架設の橋長 168m, 径間数 8, 全幅員 11m を有するゲルバーヒンジ RC-T 桁橋で, 供用 70 年を経て 2013 年から撤去工事が始まった橋

梁である。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る。また, SK 橋は瀬戸内海に流れ込む河口から 1km 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。

2.2 検討の目的と考え方

本検討では, 劣化要因が中性化あるいは塩害とした場合を対象として, 老朽化橋梁から採取したコンクリートコアの劣化評価を行い, 余寿命推定手法について検討することを主たる目的とする。検討ではコンクリートコアの採取に始まり, コアの分析調査, 主たる劣化要因の特定, 劣化進行にかかわる推定を経て, 余寿命の推定をすることになる。そして, 一連の検討からコンクリートコア試験と目視点検によるシステム評価(以下, BREX)との対応関係を示すことで, 実橋梁から採取したコンクリートコアを用いた局部評価結果と BREX による全体評価結果の関連性を把握する, 各評価手法を適切に診断に活用する, という進展が期待できる。また, 全体評価への拡張により, コンクリートコアの採取本数を減らせる効率的な試験にすることなども考えることができる。

3. コンクリートコア試験の方法

3.1 コンクリートコアの採取

点検した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 の展開図の中に●および○印で示す。各スパンの横桁を目安に分割した 4 つの領域を考えてコンクリートコアを採取し, 採取した領域で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⁶⁾。採取したコアでは, 塩化物イオンの測定(C シリーズ: 図中の C 表記のコア)と中性化試験及び機械特性の試験(M シリーズ)を行うこととした。

3.2 コア調査

(1) 塩化物イオン濃度の分析

*1 電気化学工業株式会社 中央研究所 博士(工学) (正会員)

*2 山口大学 大学院理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*3 山口大学 大学院理工学研究科環境共生系専攻 博士(後期)課程 (学生会員)

*4 山口大学 大学院理工学研究科教授 工学博士 (正会員)

採取したCシリーズのコンクリートコアについて、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、初期塩分量がわか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。

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

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、 $C_i(x,0)$ はコンクリート中の初期塩分量である。

(2) 中性化深さの測定

採取した M シリーズのコンクリートコアについて、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する方法(JIS A 1152)で中性化深さの測定を行った。

4. コンクリートコア試験の結果

4.1 塩化物イオン濃度の分析結果

表-1に採取したコア(Cシリーズ)の塩化物イオン濃度に関する結果を示す。表-1で表面塩化物イオン濃度 C_0 、見かけの拡散係数 D 、初期塩分量 $C_i(x,0)$ は式(1)に対応した定数で、分割したコアのそれぞれの分析結果を用いて求めた。かぶりは断面観察から平均的に 40mm 程度であったので、その位置に対応するコア(30~45mm)の分析結果の値を鉄筋位置での塩化物イオン濃度として示した。調べたコアの塩化物イオン濃度の分布は図-2に示す3つのタイプがみられた^{7,8)}。各コアのタイプを表-1に併

記する。(a)タイプ、(b)タイプでは図-2の塩化物イオンの分布からもわかるように、式(1)を適用することが難しいので表-1には(c)タイプのみ C_0 、 D 、 $C_i(x,0)$ の算出値を表-1に示した。

4.2 中性化深さの測定結果

表-2に採取したコア(Mシリーズ)の中性化試験の結果を示す。中性化深さとして、10点計測の平均値、最大値、標準偏差、そして平均値での中性化速度を示した。

4.3 主たる劣化要因の特定

表-1において、調査した主桁の鉄筋位置での平均塩化物イオン濃度は 0.47kg/m^3 と鉄筋腐食限界濃度 1.2kg/m^3 に至っていない。また、70年経過した状態で12点の計測のうち1点だけが鉄筋腐食限界濃度をわずかに超える結果であった。

表-1 塩化物イオン濃度にかかわる結果

主桁	コアNo.	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	みかけの拡散係数×10 ⁸ (cm ² /s)	初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	鉄筋位置での塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	図-2のタイプ
1	C1131	—	—	—	0.58	(a)
	C1134	1.00	0.08	0.30	0.32	(c)
	C1138	—	—	—	0.53	(a)
2	C2031	—	—	—	0.90	(a)
	C2136	—	—	—	1.36	(b)
3	C3134	1.10	0.45	0.10	0.46	(c)
	C3138	0.85	0.10	0.15	0.21	(c)
4	C4031	0.85	0.50	0.15	0.48	(c)
	C4136	1.32	0.05	0.12	0.14	(c)
5	C5031	1.27	0.04	0.22	0.21	(c)
	C5134	1.32	0.04	0.12	0.16	(c)
	C5038	1.30	0.03	0.30	0.30	(c)

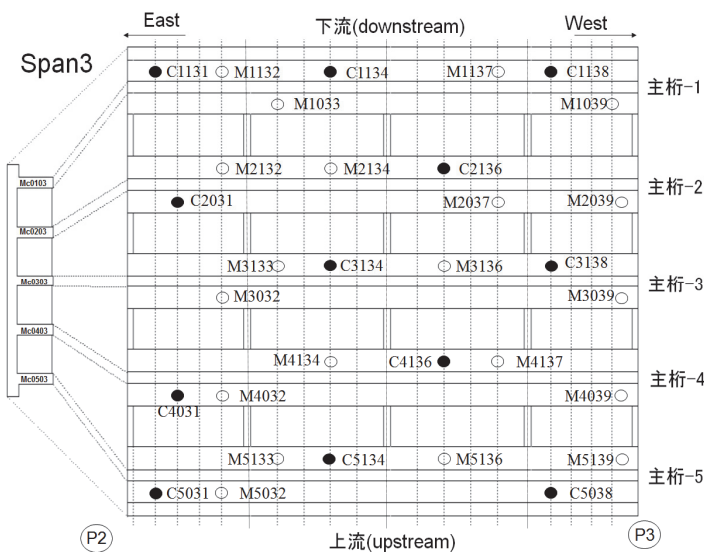


図-1 コア採取位置

- : 塩化物イオン調査用コアの位置
- : 中性化深さ調査用コアの位置

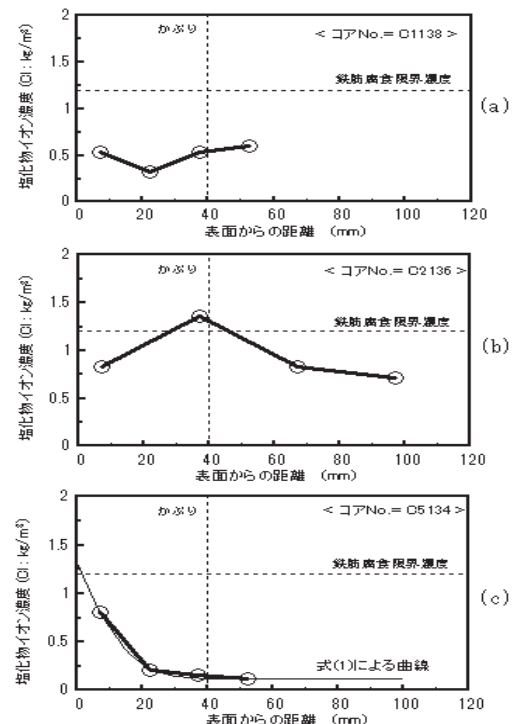


図-2 塩化物イオン濃度の分布のタイプ

表-2 において、調査した主桁の中性化深さの平均値をみると 49mm となり、かぶりを越えた結果になった。これは中性化の影響が大きくなる目安である中性化残り 10mm を大きく上回るものであった。また、中性化深さの最大値では 60mm 以上と、かぶりを大きく上回る結果になるものが半数近いコアでみられた。

コア採取した橋梁の環境として、SK 橋付近や河口の水の分析を行った。その結果、SK 橋では河口の海の水に比べ Cl^- , Na が少なく、塩害劣化と判定した KT 橋⁹⁾に比較しても Cl^- , Na^+ の量は 1/2 以下と小さいことがわかった。

以上より、塩化物イオン濃度が鉄筋位置で鉄筋腐食限界濃度に至っていないこと、中性化深さがかぶりを大きく越えていることから SK 橋の主たる劣化要因を中性化と特定した。

5. コンクリートコア試験による余寿命推定手法

5.1 中性化を対象とした余寿命推定手法の考え方

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」¹⁰⁾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 X 年と供用年 N から次式で表される。

$$\text{余寿命 } R = X - \text{供用年 } N \quad (2)$$

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 4.3 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。

表-2 中性化深さの測定結果

主桁	コアNo	中性化深さ(mm)			中性化速度 (mm/√年)
		平均値	最大値	標準偏差	
1	M1132	54.0	60	5.7	6.45
	M1033	52.6	55	2.1	6.29
	M1137	40.2	47	5.9	4.80
	M1039	52.4	56	1.9	6.26
2	M2132	43.6	48	4.3	5.09
	M2134	58.2	65	4.2	6.96
	M2037	53.8	57	3.1	6.43
3	M2039	79.8	90	8.5	9.54
	M3032	11.2	15	4.5	1.34
	M3133	44.6	80	27.0	5.33
	M3136	46.0	55	5.3	5.50
4	M3039	40.8	58	14.5	4.88
	M4032	58.4	77	9.6	6.98
	M4134	51.4	55	2.9	6.14
	M4137	42.2	47	3.7	5.04
5	M4039	51.6	70	12.1	6.17
	M5032	56.8	62	2.8	6.79
	M5133	37.4	48	7.0	4.47
	M5136	60.6	90	19.9	7.24
M5139	43.8	55	9.5	5.24	

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を提供するものと考え、中性化範囲の広がりによる鉄筋累積腐食量に着目し、その累積腐食量が限界値に至った時を寿命と仮定した。そして、式(2)より余寿命を推定した。

図-3 に、劣化要因を塩害として考えた場合と中性化(図-3 中の点線の範囲)として考えた場合の余寿命推定手法のフローを示す。図-3 のフローでは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 X 年の推定のためには、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鉄筋腐食量の設定という 3 つの情報が必要となる。

時間 t のときの中性化深さ x は、次式の中性化速度係数 A を用いて求める。中性化範囲の経時的な推定は \sqrt{t} 則に従い、中性化速度係数 A は時間 t (計測時) の中性化深さ x から次式で求める。

$$A = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

次に鉄筋腐食の推定であるが、鉄筋腐食速度を以下のように求める。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(4)、10mm 以下の場合は式(5)によって鉄筋腐食速度 V を求める^{11),12)}。

$$V = 1.32(Cl - 1.2) \times k \quad (4)$$

$$V = (0.840W - 0.145C + 1.32Cl + 0.0293W \cdot C - 0.0917C \cdot Cl + 0.658Cl \cdot W - 2.52) \times k \quad (5)$$

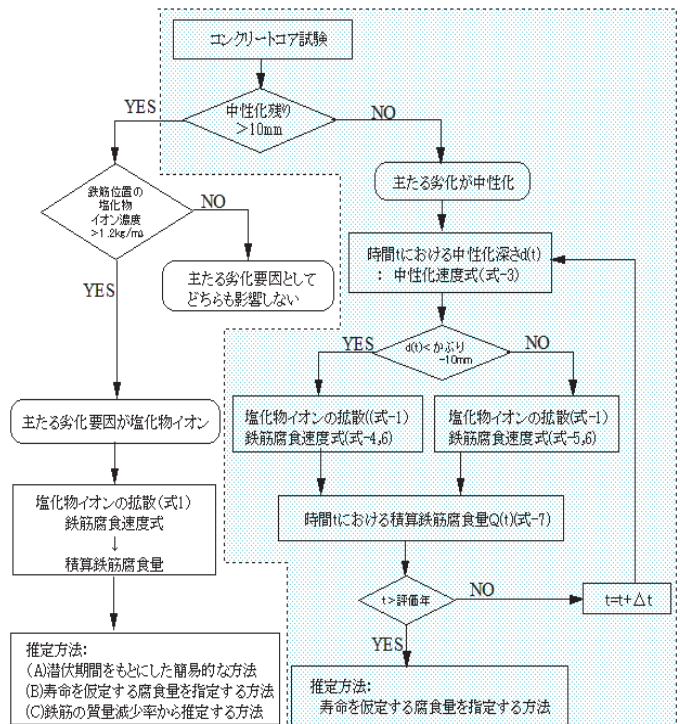


図-3 余寿命推定値の算出フロー

ここで、 $V(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年})$ 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、 k は気温 $tmp(^{\circ}\text{C})$ のときの補正式であり、次式で求められる。

$$k = 1 + 0.0381 \times (tmp - 20) \quad (6)$$

これより、時間 t での鉄筋累積腐食量 $Q(t)$ は、時間 t での鉄筋腐食速度 $V(t)$ と積算時の分割時間 dt により表せるので、次式で求められる。

$$Q(t) = Q(0) + \sum_{t=dt}^{t=X} \left(\frac{dt}{2} \left(V \left(t - \frac{dt}{2} \right) + V \left(t + \left(\frac{dt}{2} \right) \right) \right) \right) \quad (7)$$

ここで、 $Q(0)$ は次式となる。

$$Q(0) = \frac{dt}{4} \left(V(0) + V \left(\frac{dt}{2} \right) \right) \quad (8)$$

主たる劣化要因が塩化物イオンである場合は、潜伏期間を用いた簡易的な算出方法や鉄筋累積腐食量を設定する方法、などが報告されている^{1),9)}。本研究では、式(7)で求まる鉄筋腐食量が寿命を仮定する腐食量 Q_c に至った時間 x をもとに式(2)から余寿命を推定した。

5.2 余寿命推定結果

寿命を仮定する鉄筋腐食量については、既往の報告では評価基準 Q が $1 \sim 576(\text{mg}/\text{cm}^2)$ と幅のある値になっている¹³⁾。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た健全度評価点を劣化曲線で評価して行うものであるが、推定余寿命年のときの鉄筋腐食量が $75\text{mg}/\text{cm}^2$ となる検討結果が報告されている^{1),14)}。そこで評価基準 Q を、中性化によるひび割れ発生腐食限界量¹⁵⁾とされている鉄筋腐食量 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ の場合、図-3の塩化物イオンによる劣化評価で BREXによる余寿命と同じ結果となる $75\text{mg}/\text{cm}^2$ とした場合について、余寿命推定を行った。推定の対象とした

表-3 余寿命推定結果

主桁	コアNo	Q=10mg/cm ²	Q=75mg/cm ²		
		ひび割れ発生限界(年)	x(年)	余寿命R(年)	式(12)の結果(年)
1	C1134	27	62	-8	-9
	C3134	38	69	-1	3
3	C3138	46	92	22	21
	C4031	24	57	-13	-15
4	C4136	44	95	25	21
	C5031	28	62	-8	-6
5	C5134	54	110	40	38
	C5038	39	76	6	9
	平均値(年)	37.5	77.9	7.8	7.5

ものは表-1のCシリーズのコアで塩化物イオンの拡散定数が求められた8つのコアについて行った。また、中性化速度については、図-1で採取位置に近いMシリーズのコアの結果を用いた。なお、鉄筋かぶり 40mm 、式(6)での tmp は平均気温として 16°C 、式(5)の W は 4% ^{16),17)}を用いた。

推定結果を表-3に示す。表-3より、中性化によるひび割れ発生腐食限界量¹⁴⁾に至るまでは平均37.5年、その後、約40年の経過で余寿命の判定基準とした鉄筋腐食量に至っていることがわかる。また、対象スパンから採取した8本のコアの推定余寿命の平均値は7.8年であるが、採取位置により推定余寿命が-13年から40年と差が大きいことがわかる。

5.3 考察

(1) 鉄筋腐食量の評価結果への影響

表-3の余寿命推定では、塩害が主たる劣化要因であった場合に BREXでの余寿命推定と同じ結果となる累積鉄筋腐食量 $(75\text{mg}/\text{cm}^2)$ ^{1),15)}を用いたが、余寿命推定ではこの設定値が重要と考えられるので、各コアの余寿命推定値が設定する累積鉄筋腐食量によりどの程度変わるかを調べた。

表-3に設定した累積鉄筋腐食量 Q と寿命 X の関係を示す。これより本検討での余寿命 R と Q の関係は次式で表される。

$$R = 13.7 \cdot Q^{0.403} - 70 \quad (9)$$

図-4より評価基準 Q を中性化によるひび割れ発生腐食限界量の10倍の $100\text{mg}/\text{cm}^2$ にした場合は寿命の平均値が89年となり、式(9)より余寿命は19年となる。これは表-3の結果より余寿命が10年以上長い。また、評価基準 Q を5倍の $50\text{mg}/\text{cm}^2$ にした場合は-6年と余寿命は負の値になる。したがって、表-3では設定値 Q を $75\text{mg}/\text{cm}^2$ としたが、設定値 Q に関しては主たる劣化要因が異なることも踏まえて BREXの推定結果と比較して検討する必要があると考えられる。

(2) 推定式の設定値の評価結果への影響

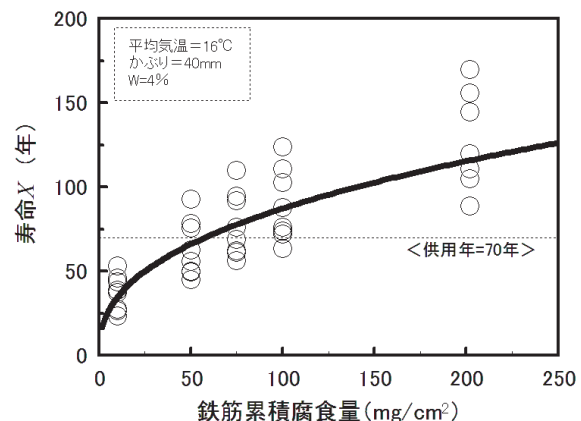


図-4 設定する累積鉄筋腐食量 Q と推定寿命 X の関係

表-3の余寿命推定ではコンクリートコアによる計測値をもとにしているが、式(5)の含水率は暴露試験などの結果を参考^{16),17)}に4%と設定した。満潮干潮が繰り返される環境にある橋梁の場合、含水率が大きいことも考えられるので、余寿命への含水率の影響を検討した。

表-3のコアについて含水率 W を 4, 6, 8, 10%と変えた場合の寿命 X を計算した結果を図-5に示す。また、そのときの余寿命 R と含水率 W の関係は次式となった。

$$R = 205 \cdot W^{-0.746} - 70 \quad (10)$$

図-5より、含水率 W が低い時(5%程度まで)は W の違いが余寿命へ影響しやすいが、 W が高い時(5%程度を越える時)は余寿命への影響が小さいことがわかる。

したがって、コンクリートコア試験によりより確かな余寿命推定をしたい場合は、コンクリート表面の含水率を測定しておくのが好ましいと考えられる。

(3) 余寿命の簡易的な推定法

表-3で、 Q を $10\text{mg}/\text{cm}^2$ とした場合の寿命を X_0 、 $75\text{mg}/\text{cm}^2$ とした場合の寿命を X_1 とすると、以下のような関係がみられた。

$$X_1 = 2.1 \cdot X_0 \quad (11)$$

これより、鉄筋腐食量が中性化によるひび割れ発生腐食限界量になるまでの時間の2.1倍が寿命となっていることがわかる。式(11)の比例係数は余寿命推定で設定する累積鉄筋腐食量により変わり、 $Q=50\text{mg}/\text{cm}^2$ のときは1.7、 $Q=100\text{mg}/\text{cm}^2$ のときは2.4であった。これより、中性化によるひび割れ発生腐食限界量になるまでの時間をもとにして、それに係数をかけることで寿命を推定する簡易的な方法も考えられる。

6. 考察

表-3の余寿命推定は採取コアによるものなので、局所評価からの推定になる。この局所の推定値をスパン全体の評価として活用することを考える¹⁾。

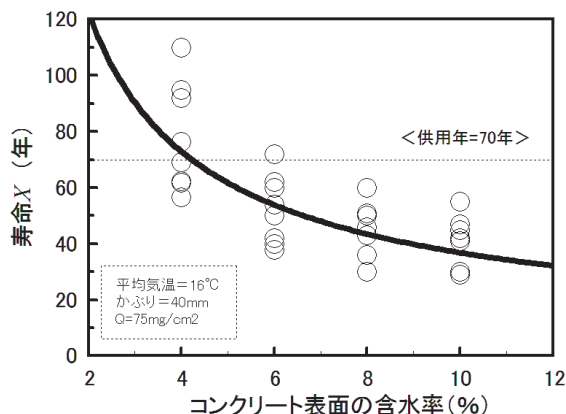


図-5 含水率の余寿命推定値への影響

表-3で推定された余寿命 R を、図-1のコア採取の位置 (x,y) により次式のような3次関数として表す。

$$R = a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fx^3 + gy^3 + hx^2y + icy^2 \quad (12)$$

これは最小二乗法により求められ、採取コアの位置と推定余寿命の結果を数値処理で表現した結果となる。ここで、 x は橋軸方向で図の左から右に向かって $x=0.5\sim 4.5$ とし、また、 y は主桁1から主桁5の方向($y=1\sim 5$)とした。

表-3の余寿命の結果を式(12)に当てはめ、その差が最小となるときの係数を求めた。その結果、 $a=-136, b=-115, c=-29.7, d=-19.7, e=11.75, f=5.15, g=-1.52, h=-5.20, i=2.41$ と係数が求めた。その3次関数から余寿命分布のコンター図を求め、結果を図-6に示す。図-6では、赤い部分が余寿命-5年以下、青い部分が余寿命15年以上のところである。これより、どの桁も主桁のEast側に余寿命が負の部分があること、下流側に位置する主桁1,2では余寿命が負の部分が桁の中央部まで広がっていること、など、全体を可視化した評価ができることがわかった。

また、近似式による余寿命の計算値と近似式を用いた余寿命の分布を考慮した平均値を表-3に併記する。これより、近似式による結果がもとの推定結果に近いこと、近似式による余寿命の分布を考慮した平均値が7.5年と表-3における各コアの単純な平均値に近い結果となることがわかった。

図-6は主たる劣化要因が中性化の場合についての結果であるが、図-2(a), (b)の場合は、表-1をみると中性

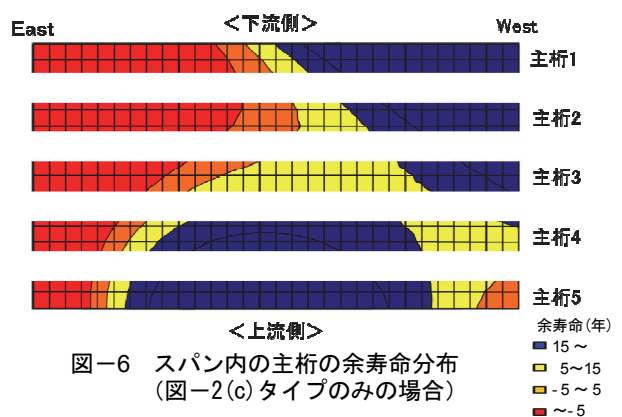


図-6 スパン内の主桁の余寿命分布 (図-2(c)タイプの場合)

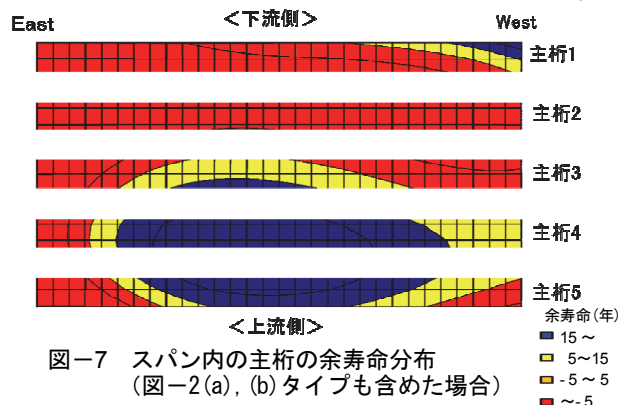


図-7 スパン内の主桁の余寿命分布 (図-2(a), (b)タイプも含めた場合)

化の影響の他に鉄筋位置での塩化物イオン濃度が高くなっていることがわかる。したがって、(a)、(b)タイプのある主桁 1,2 では図-6 の近似式で推定した余寿命より小さくなることが考えられ、余寿命が-5 年以下の赤い領域が広がることが予想される。そこで、図-2(a)のタイプの場合は式(5)の CI には時間変化のない鉄筋位置での塩化物イオン濃度を用い、図-2(b)のタイプの場合は鉄筋位置より深い位置での塩化物イオン濃度から式(1)の係数を求めた。そして、これによる余寿命推定結果を表-3 の結果に加えて近似関数を求めた。その結果、各係数は $a=-42.6, b=84.3, c=-27.8, d=-75.1, e=33.8, f=3.68, g=-4.24, h=-2.52, i=1.83$ となった。これより余寿命分布のコンター図を求めると図-7 のようになり、図-6 に比べると主桁 1,2 の余寿命低下の様子がわかる。またこのとき、近似式を用いた分布を考慮した余寿命の平均値は 0.7 年であった。これより、推定値をある程度再現できる式(12)のような近似式が導出できる程度のコンクリートコア試験の結果があれば、図-6.7 のような分布表示を含めて、スパン全体の評価に活用できると考えられる。

7. 結論

本研究は、老朽化橋梁(供用70年)から採取したコンクリートコアの劣化評価をもとに、余寿命推定手法を検討したものである。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 対象橋梁から採取したコンクリートコアの塩化物イオン濃度分布と中性化深さを測定した結果、対象橋梁の主たる劣化要因が中性化であることがわかった。
- (2) コンクリートコア試験により、中性化速度係数や塩化物イオンの拡散にかかわる係数を求め、中性化を主要因とした劣化の場合の余寿命推定手法を示した。
- (3) 余寿命は判定値である鉄筋累積腐食量によって左右される。鉄筋累積腐食量を $75\text{mg}/\text{cm}^2$ として推定を行った結果、余寿命は約7年であることがわかった。
- (4) 局所的なコンクリートコア試験結果でも近似関数を用いた分布表示を行うことで、スパン全体の評価に活用できることがわかった。

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, 宮本文穂: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp1399-1404, 2012.7.
- 3) 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂: 目視点検結果を利用した J-BMS によるコンクリート橋の健康診断および余寿命推定における学習効果, コンクリート工学年

- 次論文集, Vol.34, No.2, pp1393-1398, 2012.7.
- 4) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・フuzzy イ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.
- 5) 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.
- 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際のばらつきに関する研究, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.31, No.2, 1549-1554, 2009.
- 7) 堺孝司, 大森正貴, Mohamed Boulfiza: コンクリートへの塩化物イオンの侵入と中性化による複合作用の評価に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 17 巻第 2 号, 2006.5.
- 8) 黒田裕伸, 横田優, 佐々木孝彦, 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速度, 土木学会大 60 回年次学術講演会概要集 第 5 部, pp.763-764, 2005.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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, Vol.31, No.1, pp.1939-1944, 2009.7.
- 17) 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.