

## 論文 実橋の腐食ひび割れを考慮した塩害劣化 PC 橋の安全性低下予測

鴨谷 知繁<sup>\*1</sup>・森川 英典<sup>\*2</sup>・白川 祐太<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本論文では塩害劣化 PC-T 橋の詳細点検データの内、特に腐食ひび割れに着目し、ひび割れの発生状況や PC 鋼材の劣化状況に関する知見を整理し、腐食ひび割れを考慮した塩害劣化予測手法に関して検討を行った。そして不確定性を考慮した構造安全性に関する信頼性指標  $\beta$  により使用状態および終局状態の安全性低下予測を行った。その結果、腐食ひび割れの考慮により、使用性能の低下速度に大きな影響を与えること、スパン中央以外の領域が先に曲げ破壊し終局にいたる可能性が高いこと、塩害劣化 PC 橋の安全性低下速度は大きく、点検頻度は 2~5 年以内とすることが望ましいことなどがわかった。

**キーワード:** 塩害, PC 橋, 腐食ひび割れ, 劣化予測, 安全性評価

## 1. はじめに

PC 橋の塩害劣化は、鋼材周辺コンクリート中の塩化物イオンが、腐食発生限界濃度を超え PC 鋼材の腐食が発生し、使用性や安全性が低下する現象である。一般に、PC 橋は耐久性が高い構造物であるが、厳しい塩害環境では、早期に主ケーブルに沿ったひび割れや、シースおよび PC 鋼材の腐食が発生し、予定供用期間終了前に撤去に至っているケースもある。各研究機関では塩害劣化 PC 橋の実橋調査や載荷試験等が行われ、多くの知見が得られつつあるが、PC 橋の長寿命化やライフサイクルコストの最小化へ活用するには、課題は多いのが現状である。

著者らは、既報<sup>1)</sup>において、実際の塩害劣化 PC-T 橋の調査成果である土木研究所資料<sup>2)</sup>に示された知見である 1)シース内の平均腐食減量率とシース周辺の塩化物量との間の相関、2)シース内素線の腐食減量率のばらつき、3)素線の機械的性能低下とそのばらつき等を考慮して、使用状態および終局状態について構造安全性に関する信頼性指標（以下、安全性指標） $\beta$  に基づく PC 橋の劣化予測と安全性評価を行った。厳しい塩害環境下の構造特性の異なる PC-T 橋を対象に検討した結果、安全性は健全時の安全余裕が非常に高いため、一部の小規模橋梁を除けば ISO13822<sup>3)</sup>で示される維持管理上の目標信頼性指標を下回るまで、ある程度の期間が見込まれる一方、潜伏期終了後の安全性低下速度は大きく、特に終局状態（曲げ耐力）の評価において顕著であることを示した。

ただし、既報<sup>1)</sup>の安全性低下予測手法は、全期間においてシース周辺の塩化物イオン量を Fick の拡散方程式により求めており、加速期における腐食ひび割れの影響が十分に考慮されていない。そこで本論文では、塩害劣化 PC 橋における主方向の PC 鋼材に沿った腐食ひび割れに着目して安全性低下予測を行う方法を検討した。まず、

塩害劣化 PC-T 橋の詳細点検データ（暮坪陸橋<sup>2),4)</sup>、芦川橋<sup>5)</sup>、須井川橋、新赤石橋<sup>6)</sup>）から、腐食ひび割れの発生状況や、PC 鋼材の劣化状況との関連性等を整理した。次に、既往の RC 橋における鉄筋の低能低下予測手法<sup>7)</sup>を PC 橋における PC 鋼材の性能低下予測に適用した。腐食ひび割れが PC 鋼材の劣化に与える影響は、対象断面において腐食ひび割れを生じたケーブル数の出現確率を仮定して考慮した。そして、既報<sup>1)</sup>と同様に使用状態と終局状態において、安全性指標  $\beta$  を算出し安全性低下予測を行い、考察を行った。

## 2. 塩害劣化 PC-T 桁橋の実橋調査の整理

## 2.1 実橋調査結果概要

暮坪陸橋<sup>2),4)</sup>は日本海沿岸に建設された 5 径間の単純ポストテンション PC-T 橋である。最も劣化の著しい第 3 径間では供用後 10 年で下フランジ下面に錆汁が発生し、その 2~3 年後に錆汁、ひび割れ、はく離が見られている。また、主桁直下に岩礁や旧構造物のコンクリート残片等が存在し、一部で塩化物量の供給が特に多くなったため、その領域で腐食が早期に進展し、載荷試験ではスパン中央より先行して曲げ破壊が生じ終局に至っている。これは、塩化物イオン量が多い部分では腐食ひび割れが発生しやすく、腐食進展も早いことが要因であると指摘されている。また、ケーブル曲げ上げ部では PC 鋼材の破断が発生しており、原因として 1)ケーブル曲げ上げ部のかぶりは下フランジと比較して小さい、2)下フランジ上面は塩化物イオンが蓄積されやすい、3)曲げ上げ部は PC 鋼材位置が鉛直方向だけでなく水平方向にも変化するため、緊張力の水平分力により鉛直方向のひび割れが発生しやすいことが挙げられている。

芦川橋<sup>5)</sup>は秋田県日本海側の海岸線から 40m、桁下か

\*1 (株)ピーエス三菱大阪支店 設計センター設計グループ 工修 (正会員)

\*2 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 教授 工博 (正会員)

\*3 神戸大学工学部建設学科

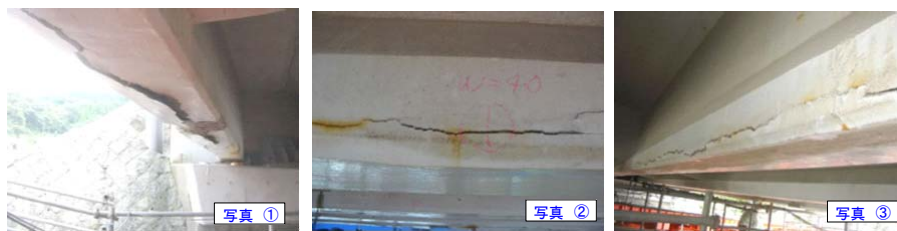
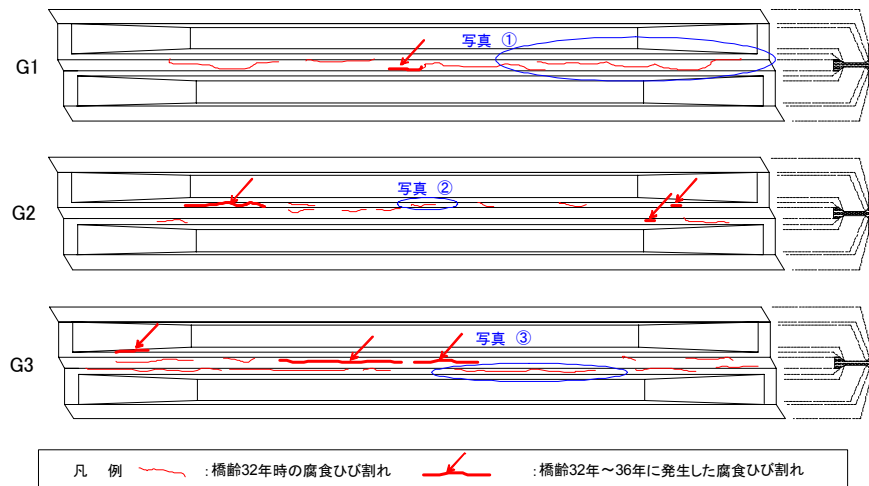


図-1 須井川橋 腐食ひび割れ分布とひび割れ状況写真

ら海面まで12mの位置に建設された橋梁である。建設後10年で下フランジ下面に著しい塩害劣化が生じている。ひび割れ分布について詳細は文献で確認できないが、文献に示される写真ではウェブの損傷はあまり見られていないのに対して、下フランジには橋軸方向の腐食ひび割れが確認できる。

兵庫県の日本海沿岸に建設された須井川橋においても飛来塩分による表面塩化物の増加により、塩害劣化が発生し、シースの腐食、PC鋼材の腐食、一部にはPC鋼材の破断が確認されている。図-1に須井川橋の腐食ひび割れ分布とひび割れ状況写真を示す。橋齢32年時の調査時点で、下フランジに橋軸方向の腐食ひび割れが多数発生しており、橋齢36年時の詳細調査では新たな腐食ひび割れが確認されている。同一断面内に発生する腐食ひび割れ本数に着目すると、1本の領域が多く、2本以上の領域（特に3本以上）は少なくなっている。また、腐食ひび割れの多くは下フランジ下面および側面のハンチより下側に発生している。須井川橋の橋齢36年時における腐食ひび割れ発生位置近傍のPC鋼材とシースの腐食状況を図-2に示す。撮影位置は、図-1における写真①(G1)である。腐食ひび割れを生じたケーブル(写真上側)では、シースが大きく損傷しPC鋼材の激しい腐食や破断が確認されたのに対して、その隣のケーブル(写真下側)ではシースの腐食がみられる程度の軽微な損傷であることが分かる。

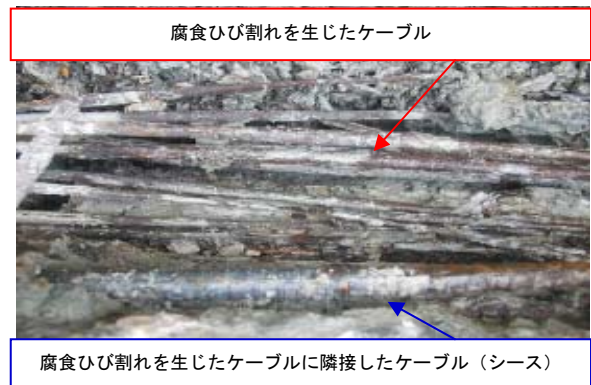


図-2 腐食ひび割れ発生位置近傍のPC鋼材とシースの腐食状況(図-1 G1下面写真①の位置)

新赤石橋<sup>6)</sup>は青森県内の日本海岸近くに建設されたPC-T橋である。厳しい塩害環境のため劣化が進行し、表面被覆や外ケーブル補強が実施されている。文献では橋齢34年時のひび割れ状況写真と第2径間と第3径間のひび割れ展開図が記載されている。主ケーブルに沿った腐食ひび割れの発生位置は下フランジに集中しており、側面のハンチ下から下面となっている。また、1主桁断面あたりの発生本数については、1本である領域が多く、2本以上の腐食ひび割れが生じている領域は局所的であることがうかがえる。

## 2.2 実橋調査結果のまとめ

以上の塩害劣化PC-T橋の実橋調査から得られた知見をまとめると以下の通りである。

1)PC-T 橋は、建設位置の環境条件によりそれぞれ固有の表面塩化物イオン量の分布が存在すると考えられ、表面塩化物イオン量が多く、かぶりの小さい領域ほど PC 鋼材の腐食開始までの期間(潜伏期)は短いと考えられる。

2)塩害劣化 PC-T 橋はケーブル曲げ上げ部から下フランジ帯が腐食ひび割れを発生しやすいと考えられる。この領域では PC 鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間(進展期)は短い傾向にあると想定される。

3)腐食ひび割れの発生位置は、ほとんどのケースで下フランジのハンチより下側と下面であり、この領域に配置された PC 鋼材の劣化が特に顕著であると想定される。

4)下フランジに発生する腐食ひび割れは、調査時には 1 主桁断面あたり 1 本である領域が多く、2 本以上である領域は少ない傾向にある。また、下フランジに配置されたケーブル(シース)においては、腐食ひび割れを生じたケーブルとそれに隣接するケーブルの腐食状況は大きく異なっている。つまり、下フランジの腐食ひび割れは局所化しやすく、腐食ひび割れ発生の有無により PC 鋼材の腐食速度は大きく異なると想定される。

次章では、これらの特徴を考慮して PC 橋の安全性低下予測を行う。ただし、以上の特徴はグラウト充填状況が比較的良好な場合を想定している。偶発的な理由によりグラウト充填不良が発生している領域では、文献<sup>8)</sup>のように腐食鋼材の膨張圧がコンクリートに伝わりにくいため、PC 鋼材が腐食していても、腐食ひび割れが目視で確認されない可能性があり別途注意を要する。

### 3. 腐食ひび割れを考慮した PC-T 橋の安全性低下予測

#### 3.1 安全性低下予測を行う橋梁の概要

安全性低下予測の対象橋梁は須井川橋(既報<sup>1)</sup>)における B 橋)とする。概要を表-1、B 活荷重載荷時の復元設計結果を表-2 に示す。本研究では、曲げ上げ部近傍が先行劣化したために、載荷試験においてスパン中央部ではなく曲げ上げ部の終局で破壊した暮坪陸橋の例を考慮して、スパン中央とスパン 4 分の 1 を評価対象断面とした。対象橋梁ではスパン 4 分の 1 ではスパン中央部に比べて断面力が 6 割程度である一方、スパン 4 分の 1 に配置されない上縁定着ケーブルがあるため、安全率は、スパン中央部の約 1.3 倍程度にとどまっている。環境条件は既往の報告と同様、厳しい塩害環境を想定して表面塩化物イオン量を仮定した。またコンクリートの見かけの拡散係数は既報<sup>1)</sup>と同様の値を仮定した。これらを表-3 に示す。本研究では、同一断面内での表面塩化物量と拡散係数は全て同じとした。シースのかぶりは図-3 のように、既報<sup>1)</sup>と同様各断面の設計値で固定した。

#### 3.2 塩害劣化予測手法

既報<sup>1)</sup>の PC 橋の安全性低下予測では、潜伏期の予測

のみに通常用いられる Fick の拡散方程式を供用開始後の全期間に渡って適用し、シース周辺の塩化物イオン濃度の経年変化を求めている。そして、暮坪陸橋の調査データに基づいたシース周辺の塩化物イオン濃度とシース内素線の平均腐食減量率との関係より、シース内素線の平均腐食減量率を予測し、安全性低下予測を行っている。そのため、この予測手法では加速期における腐食ひ

表-1 安全性低下予測を行う橋梁の概要

対象橋梁	須井川橋
形式	ポストテンション方式単純 T 桁橋
主桁本数	5 主桁
支間長	25.800m
桁高	1500mm
桁幅	1500mm
鋼材(シース)の最小かぶり	50mm×3 本 75mm×3 本 (2 本) 96mm×1 本 (0 本) 125mm×1 本
引張側鋼材	12φ7mm 8 本 (6 本)
PC 鋼材断面積	3692.64mm <sup>2</sup> (2769.48mm <sup>2</sup> )
PC 鋼材引張強度	1704MPa
PC 鋼線最大荷重時ひずみ	64000μ
有効プレストレス	900MPa

( ) はスパン 4 分の 1 の値

表-2 復元設計結果(供用開始時)

対象橋梁	スパン中央	スパン 4 分の 1	許容値※
下縁合成応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	1.48	5.92	-1.8
①断面力 (kN・m)	3146.2	1811.6	-
②耐力 (kN・m)	8010.0	6007.5	-
①/② 安全率	2.5	3.3	-

※道路橋示方書に示されるコンクリート強度 50N/mm<sup>2</sup> の値

表-3 塩化物浸透予測に関する要因表

要因	平均値	標準偏差
表面塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )	10.1	1.77
コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm <sup>2</sup> /year)	0.250	0.195

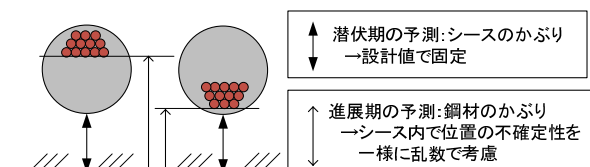


図-3 劣化予測におけるかぶりの考慮方法

び割れによる鋼材腐食速度の増大が詳細には考慮されていない。そこで、本研究では既往の RC 橋を対象とした劣化予測手法<sup>7)</sup>を参考に、潜伏期、進展期、加速期前期および加速期後期に分け、PC 鋼材の劣化予測を行った。

まず、潜伏期は Fick の拡散方程式でシース周辺の塩化物イオン量を予測し、腐食発生限界塩化物イオン量  $1.2\text{kg/m}^3$  を超えた時点で潜伏期終了とした。次に、進展期における腐食速度は加速期初期の腐食速度で一定であると仮定した。この仮定により進展期を予測するパラメータは腐食ひび割れ発生限界腐食量となるが、これは森永式<sup>9)</sup>である式(1)により算出した。

$$y_l = 1.204 (1 + 2d/\phi)^{0.85} \cdot \phi / 2 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

ただし、 $y_l$  : ひび割れ発生限界腐食量( $\text{mg/mm}^2$ )

$\phi$  : PC 鋼材の換算直径 (mm)

$d$  : PC 鋼材のかぶり(mm)

PC 鋼材の換算直径  $\phi$  には、 $12\phi 7\text{mm}$  を 1 本の PC 鋼材と仮定して、断面積が等しくなるように求めた  $24.3\text{mm}$  を代入した。また、PC 鋼材のかぶり  $d$  は図-3 のように PC 鋼材のシース内での偏在を考慮して、シース内での位置が一般的な乱数に従うと仮定した。

加速期の予測では、図-2 で示した腐食ひび割れの有無によるケーブル腐食状況の差を考慮して、腐食ひび割れが発生しないケーブルの腐食速度は加速期初期の腐食速度のまま一定とした。そして、腐食ひび割れが生じたケーブルは、以下のように加速期における腐食速度の増大を考慮した。まず、加速期前期の予測は、既往の文献<sup>10)</sup>を参考に、鋼材腐食量が腐食ひび割れ幅および腐食速度と量的関係を有するとして図-4 に示す三者の関係を仮定した。この仮定により腐食ひび割れ幅・腐食量・腐食速度は時間  $t$  の関数として式(2)~(4)として表わされる。

$$x = C \cdot \exp(a/a \cdot t) \quad (2)$$

$$y = a \cdot C \cdot \exp(a/a \cdot t) \quad (3)$$

$$\sigma = a \cdot C \cdot \exp(a/a \cdot t) \quad (4)$$

ただし、 $x$  : ひび割れ幅(mm)

$y$  : 腐食量( $\text{mg/mm}^2$ )

$\sigma$  : 腐食速度( $\text{mg/mm}^2/\text{year}$ )

$C$  : 腐食開始直後の腐食ひび割れ幅(mm)

$a$  : 腐食量とひび割れ幅の換算係数( $\text{mg/mm}^3$ )

$a$  : 腐食速度とひび割れ幅の換算係数( $\text{mg/mm}^3/\text{year}$ )

ここで  $a$  は丸鋼の電食実験値の回帰式である式(5)より、 $a$  は、既往の研究<sup>11)</sup>より求められた式(6)より評価した。初期腐食ひび割れ幅は、ひび割れ発生限界腐食量より、式(7)を用いて算出した。

$$a = 0.354 \cdot \exp(0.1498 \cdot d/\phi) \quad (5)$$

$$a = 54.82 \cdot d^{1.17} \quad (6)$$

$$C = y_l/a \quad (7)$$

ただし、 $y_l$  : 腐食ひび割れ発生限界腐食量( $\text{mg/mm}^2$ )

加速期後期の予測では、腐食速度はある値にまで増加したのち一定となると考え、その限界腐食速度を既往の研究<sup>7)</sup>に従い海水中の腐食速度  $1.02(\text{mg/mm}^2/\text{year})$  を 5% の特性下限値、1 日ごとに乾湿促進した鉄筋の腐食実験結果の値  $2.81(\text{mg/mm}^2/\text{year})$  を 5% 上限特性値とした標準正規分布に従うと仮定した。対象橋梁における各シース内素線の平均腐食減量率の経年変化(平均値)を図-5 に示す。予測結果は、腐食ひび割れ発生の有無により大きな差が生じる結果となっている。

以上の劣化予測に基づき、PC 橋の安全性評価を行う場合、腐食ひび割れを生じたケーブルの本数が安全性に与える影響は大きい。そこで本研究では 2 章で述べた腐食ひび割れの傾向(調査時には 1 主桁断面あたり 1 本である領域が多く、2 本以上である領域は少ない)を考慮して、評価対象断面において腐食ひび割れを生じたケーブル本数の出現確率を表-4 のように仮定した。この数値は数少ない実橋データに基づいており、現在のところ定量的な評価には至っていないため、今後さらなるデータ収集と分析が必要であると言える。

### 3.3 安全性評価手法

既報<sup>1)</sup>に準じて、使用状態および終局状態の安全性指標  $\beta$  を算出し評価を行うこととした。安全余裕  $M$  を使用状態においては下縁合成応力度 - 許容応力度 ( $-1.8\text{N/mm}^2$ )、また終局状態においては耐荷力 - 断面力と定義すると、安全性指標  $\beta$  は式(8)のように表される。

$$\beta = \mu_M / \sigma_M \quad (8)$$

ただし、 $\mu_M$  :  $M$  の平均値、

$\sigma_M$  :  $M$  の標準偏差

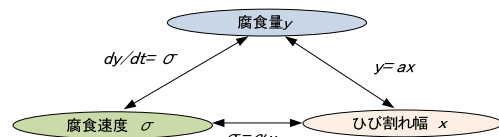


図-4 加速期における腐食パラメータの関係

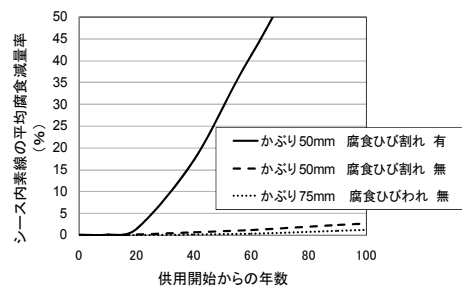


図-5 PC 鋼材の劣化予測(平均値)

表-4 評価対象断面において腐食ひび割れを生じたケーブル本数の出現確率

	0本	1本	2本	3本
出現確率	5%	70%	20%	5%

断面力は、B 活荷重（超過重量車両通行時の安全性を考慮して変動係数が 16.6%<sup>12)</sup> の正規分布で仮定）および死荷重を考慮して平面格子解析により算出した。

次に、耐荷力の算出法を示す。まず 3.2 節で予測したシース内素線の平均腐食減量率に、文献<sup>2)</sup>に基づき評価したシース内素線の腐食減量率の不確定性<sup>1)</sup>を考慮して各素線の腐食減量率を算出し、図-6 に示す PC 鋼線の機械的性能低下とその不確定性より各素線の引張強度残存率と伸び残存率を算出した。それを全素線分足しあわすことで全素線の引張合力-ひずみ関係を導出し、最大引張合力時の設計断面におけるひずみ分布から偶力モーメントを算出して耐荷力を求めた。

最後に下縁合成応力は鋼材腐食によるプレストレス低下を考慮して算出する。本研究では、グラウト充填状態が比較的良好であると想定し、コンクリートと PC 鋼材の完全付着を仮定した。これより各素線のプレストレス残存率は PC 鋼材の断面残存率（引張強度残存率）との比例関係より求められる。そして全素線分足し合わせて算出した全素線のプレストレス力と断面力より下縁合成応力を算出した。以上、本章で行った塩害劣化 PC 橋の安全性評価手法は図-7 のように整理される。

#### 4. シミュレーション結果と考察

図-8 に安全性指標  $\beta$  の経年変化を示す。使用状態および終局状態において、腐食ひび割れを考慮した本研究の劣化予測法による結果（スパン中央とスパン 4 分の 1）と既報<sup>1)</sup>のシース内の平均腐食減量率とシース周辺の塩化物イオン量との相関を考慮しシース周辺の塩化物イオン量を Fick の拡散方程式によって求める方法による結果（スパン中央）を示している。

##### 4.1 使用状態の評価

使用状態では、本研究の劣化予測は、既報<sup>1)</sup>の予測と比べて潜伏期終了後の低下割合が大きい結果となっており、腐食ひび割れの影響が顕著に表れた。劣化予測手法の違いにより予測結果に大きな差が生じるため、使用

状態の劣化予測では、腐食ひび割れを生じたケーブルの加速期における腐食速度の評価が非常に重要であると考えられる。次にスパン中央とスパン 4 分の 1 の比較を行う。スパン 4 分の 1 では、本研究においては劣化程度が小さいと評価される上縁定着ケーブルがスパン中央よりも 2 本少ないため、断面内の全 PC 鋼材における平均腐食減量率がスパン中央と比較して大きくなり、安全性低下速度が大きくなっている。しかし表-2 のようにス

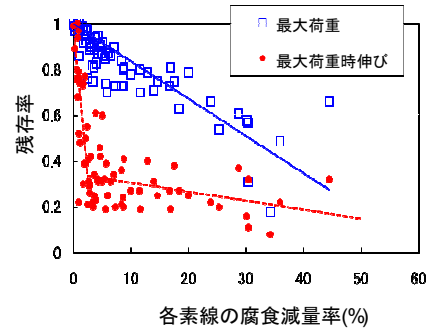


図-6 PC 鋼線の機械的性能低下とその不確定性

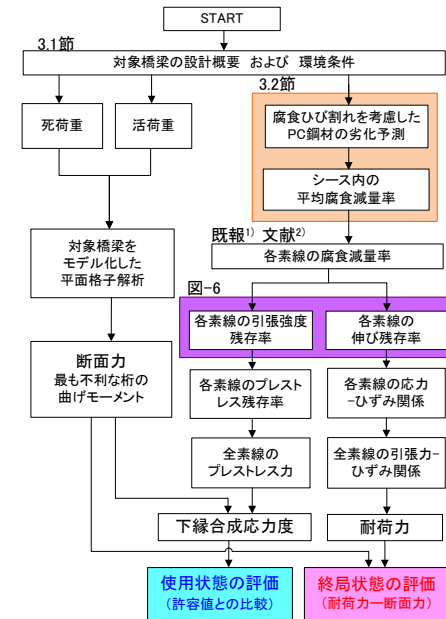


図-7 塩害劣化 PC 橋の安全性評価フロー

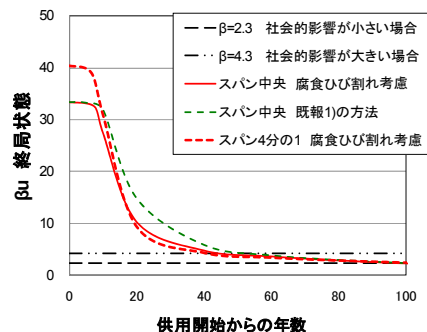
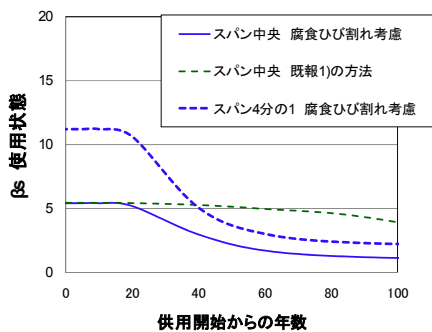


図-8 安全性低下予測結果（左：使用状態 右：終局状態）

パン4分の1では供用直後の下縁合成応力度が大きく余裕があるため、常にスパン中央の方が厳しい予測結果となっている。以上より使用状態の評価では、環境条件の空間的な不確定性が大きな場合を除けばスパン中央の評価より安全側の評価が可能と考えられる。

#### 4.2 終局状態の評価

終局状態では本研究の劣化予測結果は、既報<sup>1)</sup>の予測と比べてやや安全性低下速度が大きい結果である。しかし、その差は最大10年程度であり、両者の差は使用状態と比べて小さい。これは図-6のように、腐食減量率の小さい状態でもPC鋼材の伸び性能は大きく低下するため、PC桁が部材降伏する前に劣化PC鋼材の破断が発生しやすく、結果としてPC桁の耐荷力の大幅な低下に至り、図-5のような腐食速度の違いが明確に表れにくいためと考えられる。安全性低下速度は、いずれの予測手法でも潜伏期終了後10年~20年の間に安全性指標が急激に低下しており大きいものと判断できる。仮にこの期間に点検が実施されなかったとすると、対策費用の増大や維持管理対策の難易度を高めることになりLCCの増大につながる。よって、厳しい環境条件では、2~5年程度まで点検頻度を上げる必要があり、さらに点検で腐食ひび割れが確認された場合には、更なる点検強化とともに早急な詳細調査の実施が望まれる。次に、スパン中央とスパン4分の1について比較を行う。スパン4分の1の方が、表-2に示すように供用開始時の安全率が大きいために $\beta_u$ の値も大きい。潜伏期終了後の性能低下速度が大きい。供用開始後15年以降ではスパン中央よりやや小さい値となっている。終局状態での評価では使用状態と異なり、スパン中央以外の部分が先行して性能低下する場合が十分に考えられるため、環境条件の空間的な不確定性を詳細に考慮するとともに、評価においては劣化度の大きな断面での検討が必要である。

#### 5. まとめ

本論文では、塩害劣化PC-T橋に関する既往の詳細点検データより特に腐食ひび割れの発生状況や、PC鋼材の劣化状況について整理し、主方向のPC鋼材に沿った腐食ひび割れに着目して塩害劣化PC橋の安全性低下予測を行う方法について検討を行い以下の知見を得た。

- 1)PC-T橋では下フランジのハンチより下側と下面で腐食ひび割れが発生しやすく、1断面あたり1本である領域が多く2本以上である領域は少ない傾向にある。
- 2)実橋調査では、腐食ひび割れが生じたケーブルの腐食状況とそれに隣接するケーブルの腐食状況は大きく異なることが確認された。
- 3)PC-T橋の安全性低下予測において、腐食ひび割れを考慮した本研究の方法による予測結果は既報<sup>1)</sup>の方法の結

果より厳しい結果となり、特に使用性能の低下速度に大きな影響を与えた。

- 4)終局状態の評価ではスパン中央以外が先行して性能低下する可能性が高いため、環境条件の空間的な不確定性の考慮や劣化度の大きな断面での検討が必要である。
- 5)厳しい塩害環境のPC-T橋は潜伏期終了後の性能低下速度が大きいため合理的な維持管理を実施するには、点検頻度を2~5年程度まで上げる必要がある。特に、腐食ひび割れが確認された場合には、更なる点検強化とともに早急な詳細調査の実施が望まれる。

#### 謝辞

実橋調査についてご協力をいただきました兵庫県土整備部に、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鴨谷知繁, 森川英典: 厳しい塩害環境下にあるPC橋の性能低下シミュレーション, 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9巻, pp.131-138, 2009.10.
- 2) 土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅲ), 土木研究所資料, No.3810, 2001.3
- 3) ISO: INTERNATIONAL STANDARD Bases for design of structures - Assessment of existing structures, ISO13822, First edition, 2001.12.
- 4) 土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅱ), 土木研究所資料, No.3809, 2001.3.
- 5) 同上(Ⅳ), No.3816, 2001.3.
- 6) H.Minagawa, Y.Koda, M.Hisada: Inspection of PC bridge girders severely damaged in coastal environment, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, pp653-660, 2009.
- 7) 森川英典, 森田祐介ら: 不確定性を考慮した塩害劣化RC橋における劣化および安全性の評価, 土木学会論文集E, Vol.62, No.1, pp.145-158, 2006.2.
- 8) 谷口博胤ら: グラウトの充填度がPC鋼材腐食に及ぼす影響, 土木学会コンクリート技術シリーズ, PC構造物の現状の問題点とその対策, pp309-314, 2003.6.
- 9) 小林豊治ら: 鉄筋腐食の診断, pp161, 1993.5.
- 10) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのリハビリテーション研究報告書, 1998.10.
- 11) 岸雅之, 森川英典ら: 鉄筋腐食劣化を考慮したRC部材の性能評価の評点化手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1171-1176, 2001.7.
- 12) 関西道路研究会道路橋調査研究委員会コンクリート橋小委員会, メンテナンスを考慮した性能設計, 2002.12.