

## 論文 塩害劣化した既設 PC 道路橋の遅れ破壊を考慮した構造安全性評価

美濃 智広\*1・森川 英典\*2

**要旨**：塩害劣化を受ける既設ポストテンション方式 PCT 桁道路橋を対象とし、PC 構造物の塩害による構造物の性能の変化について、劣化評価に関わるパラメータの不確定性と、PC 鋼線の遅れ破壊現象について脆性破壊をモデル化したモンテカルロシミュレーションにより構造安全性を信頼性指標  $\beta$  に基づいて評価した。その結果、PC 鋼線の遅れ破壊現象を考慮すると信頼性指標  $\beta$  が大きく低下し、遅れ破壊評価モデルの重要性が指摘される。また、主ケーブルの補修効果を考慮した場合、信頼性指標  $\beta$  は大きく改善することがわかった。

**キーワード**：塩害、プレストレストコンクリート橋、PC 鋼線、遅れ破壊、安全性評価

## 1. はじめに

凍結防止剤を使用する環境下にある上縁定着ケーブルを有する既設ポストテンション方式 PCT 桁道路橋（以降、既設ポステン T 桁橋）においては、定着部から曲上げ部の区間においてブリーディング等により生じたグラウト充填不良部が存在することにより、凍結防止剤に由来する塩化物イオンに起因した PC 鋼線の腐食が発生することが懸念されている。また、腐食した PC 鋼線については、遅れ破壊（活性溶解型応力腐食割れ）により脆性的な破断に至る可能性が考えられる<sup>1)</sup>。

イギリスでは 1985（昭和 60）年に、Ynys-y-Gwas 橋の落橋が発生している<sup>2)</sup>。落橋の要因は、グラウト充填不良を起因とした PC 鋼線の破断と考えられている。また、国内においても一般国道 18 号に架かる妙高大橋（新潟県妙高市）において、箱桁下床版部の PC 鋼線が破断していることが判明している<sup>3)</sup>。これらの事例からも、塩害劣化した PC 橋においては、腐食した PC 鋼線の機械的性質の低下に加えて、遅れ破壊の発生が構造安全性の低下に直結することがわかる。

腐食した PC 鋼線を有する既設ポステン T 桁橋が有する現状の安全性を評価するためには、建設当初の設計では考慮されない種々の要因の影響、例えば PC 鋼線に発生する腐食程度のばらつきや腐食 PC 鋼線の機械的性質低下のばらつき等を考慮する必要がある。特に限界状態に近い場合には、耐荷力および断面力のばらつきを考慮することが重要となる。そのための現実的な評価手法として、信頼性指標（安全性指標） $\beta$  による方法がある。信頼性指標は、基本的には材料特性、荷重作用等の安全性に影響を及ぼす因子の確率特性が測定等によって得られれば、モンテカルロシミュレーションにより算定できる。

既往の研究<sup>例えば 4),5),6)</sup>で示されるとおり、構造安全性や耐久性に関わる各種パラメータの不確定性を同時に考慮

したモンテカルロシミュレーションに基づいた信頼性評価を行う手法は、劣化のばらつきの大きな塩害に着目した検討においては合理的な手法といえる。ただし、この手法における評価指標である信頼性指標  $\beta$  に工学的な有意性を与えるためには、実橋調査等により信頼性のあるデータを採取し、考慮する各要因に代入することが必要である。

本論では、PC 鋼線束および PC 鋼線素線の凍結防止剤使用環境下における局部腐食の進行モデル<sup>7)</sup>および局部腐食を有する PC 鋼線素線の遅れ破壊発生確率モデル<sup>8)</sup>を用いて、グラウト充填不良部が確認されている上縁定着構造を有する既設ポステン T 桁橋の構造安全性を信頼性指標  $\beta$  に基づき評価した。

## 2. 検討対象とした既設ポステン T 桁橋の概要

## 2.1 検討対象橋の概要

兵庫県中部地域中山間部の県道に架橋されており現在供用中のポステン T 桁橋である M 橋を参考に構造諸元を設定したモデル橋を対象とし、構造安全性を評価した。M 橋の構造形式はポステン単純 PCT 桁であり、TL-20 活荷重で設計されている。支間長および有効幅員・全幅員については実橋と同値と設定したが、斜角については 90 度に変更した。主桁コンクリート強度は 40N/mm<sup>2</sup> とした。現在では PC 道路橋の主ケーブルとして一般に PC 鋼より線が使用されており PC 鋼線束は使用されていないが、M 橋が設計された昭和 40 年代前半では、PC 鋼線束が一般的に使用されていた。本論においては当時の設計条件に対応し、12φ7mm（引張強度 1550N/mm<sup>2</sup>）を考慮した評価を行った。評価対象モデルとした既設ポステン T 桁橋の標準断面を図-1 に、側面図を図-2 に、構造諸元一覧を表-1 に示す。

\*1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻研究員 博(工) (正会員)

\*2 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻教授 博(工) (正会員)

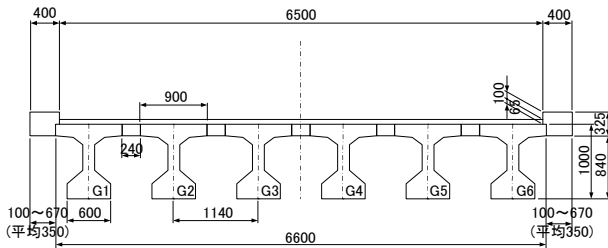
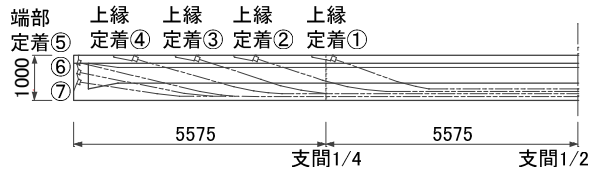


図-1 既設ポステンT桁橋の標準断面(単位:mm)



※図中の破線は主ケーブル位置を示す。

図-2 既設ポステンT桁橋の側面(単位:mm)

表-1 既設ポステンT桁橋の構造諸元一覧

支間長 L(m)	22.3	L/H	22.3
主桁数(本)	6	床版厚(mm)	160
桁高 H(mm)	1000	間詰め(mm)	240
桁幅 W(mm)	900	舗装厚(mm)	80

## 2.2 実橋調査結果

過年度 M 橋において実施された定期点検において、全ての主ケーブル (G1~G6) においてシースに沿ったひび割れおよび白色析出物が確認された。冬季期間には M 橋の橋面には凍結防止剤が散布されていること、および上縁定着主ケーブルを有する構造形式であったことから、グラウト充填不良の発生および主ケーブルの塩害劣化の発生が強く疑われた。

そこで、M 橋では全主桁の全主ケーブルについてコア削孔による詳細調査が行われ、主ケーブルの腐食劣化状況が確認された。その結果、主ケーブルの定着位置 (上縁定着、端部定着) に係わらず、ほぼ全ての主ケーブルにおいて、グラウト充填不良が発生している状況が確認された。またグラウト充填不良は、桁端部における主ケーブルの曲上り部区間にて発生しており、支間中央部の主ケーブルが主桁下フランジ内に配置されている区間においては、グラウト充填不良は発生していないことが確認された。

主ケーブルより採取した錆について塩分量調査を行った結果、上縁定着ケーブルからは 48 調査箇所中 40 箇所 (約 83%) にて塩分が検出された (最大 200mg/L)。一方、端部定着ケーブルについては 36 箇所中 1 箇所 (約 3%) においてのみ塩分が検出された (最大 75mg/L)。このことから、橋面に散布された凍結防止剤に由来した塩化物イオンが、上縁定着部を經由してシース内に侵入している状況が推察された。

最も主ケーブルの腐食劣化が進行していた G6 桁の、削孔直後および削孔内グラウト除去・除錆後の状況を、



写真-1 G6 桁の主ケーブル腐食状況

写真-1 に示す。除錆を行う前の外観からは局部腐食の進行を把握することが困難であるが、除錆を行うことにより断面欠損を伴う局部腐食を目視することが可能になっている状況が確認できる。

## 3. 劣化評価モデル

### 3.1 PC 鋼線の腐食劣化モデル

シースの曲上り部のグラウト充填不良部分が塩害劣化した、既設ポステン T 桁橋の構造安全性を詳細に評価するには、まず局部腐食が生じた PC 鋼線束内の各 PC 鋼線素線の腐食程度を適切に評価する必要がある。ここでは、詳細調査結果より把握した主ケーブル (PC 鋼線束) の腐食状況を、主ケーブルの劣化レベルとして評価し、さらに PC 鋼線束内の各 PC 鋼線素線の腐食グレードを設定することとした。

主ケーブルの劣化レベルについては、コンクリート標準示方書 [維持管理編] では鋼材腐食の簡易的な評価方法として腐食グレード I~IV による評価が提案されていることを踏まえ、グラウト充填不良部分を模擬した PC 鋼線束に関する促進腐食試験を行った結果における外面の平均局部腐食深さ  $D_{ave}$  より、局所的に局部腐食が発生しているレベルから PC 鋼線の大幅な断面欠損が認められるような著しい腐食状態までを 4 段階で判定する表-2 に示す劣化レベル案を設定した。この判定案を用いることにより、コア削孔により把握した主ケーブル外面の腐食状況より、平均的な質量減少率を評価することが可能となる。

また、腐食した PC 鋼線素線単位の腐食グレードにつ

いても、グラウト充填不良部分を模擬した PC 鋼線束に関する促進腐食試験<sup>7)</sup>を行った結果における素線の最大断面積減少率より、局所的に局部腐食が発生している状態から PC 鋼線素線の大幅な断面欠損が認められるような著しい腐食状態までの状態を4段階で判定する表-3に示す腐食グレード案を設定し、評価した。

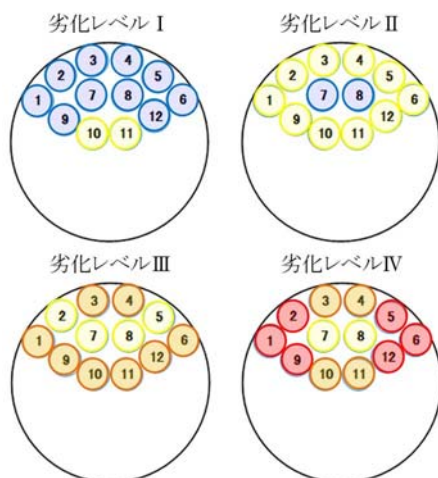
PC 鋼線素線の腐食グレードの素線位置毎の進行状況を図-2<sup>7)</sup>に示す。主ケーブルの劣化レベルの進行に伴い、PC 鋼線素線の断面位置毎に素線の腐食グレードが進行している状況がわかる。特に PC 鋼線 No.1,6, 2,5, 9,12 については、素線の腐食グレードの進行度が大きい。主ケーブルの劣化レベルの進行と PC 鋼線素線の腐食グレードの進行の関係をを用いることにより、コア削孔により

表-2 主ケーブル(PC鋼線束)の劣化レベル判定案

劣化レベル	主ケーブル(PC鋼線束)の腐食状態	外面の平均局部腐食深さ $D_{ave}$ (mm)	平均質量減少率
I	局所的に局部腐食が発生している	~0.01	6%
II	腐食が発生しており、局部腐食が複数認められる	0.01~0.03	8%
III	腐食が発生しており、多数の局部腐食が認められる	0.03~0.04	10%
IV	著しい腐食が発生しており、大幅な断面欠損や破断が想定される	0.04~	12%

表-3 PC鋼線素線の腐食グレード判定案

腐食グレード	PC鋼線素線の腐食状態	最大断面積減少率	質量減少率
①	局所的に局部腐食が発生している	~10%	6%
②	腐食が発生しており、局部腐食が複数認められる	10~15%	8%
③	腐食が発生しており、多数の局部腐食が認められる	15~20%	10%
④	著しい腐食が発生しており、大幅な断面欠損や破断が想定される	20%~	14%



※図中各数値は PC 鋼線番号を示す。  
 ※図中 PC 鋼線の着色は、PC 鋼線素線の腐食グループ(青：①，黄：②，橙：③，赤：④)を示す。

図-2 腐食期間の進行と素線の腐食進行の関係<sup>7)</sup>

把握した主ケーブル外面の腐食状況より評価した劣化レベルをもとに、素線毎の腐食グレードを評価することが可能となる。

M 橋の詳細調査において、最も主ケーブルの腐食劣化が進行していた G6 桁の劣化レベル判定を表-4に示す。G6 桁内の主ケーブル(C1~C7)において、健全な状態から劣化レベルIVの状態まで、ケーブル毎の劣化状況にはばらつきが生じていることが確認できる。

表-4 M橋G6桁各主ケーブルの劣化レベル判定

ケーブルNo	定着	主ケーブル劣化レベル	グラウト充填不良	錆層内塩分量(mg/L)	グラウト充填不良長(mm)
C1	上縁	III	有	30	1450
C2	上縁	IV	有	75	350
C3	上縁	II	有	200	1350
C4	上縁	IV	有	200	600
C5	端部	I	有	75	100
C6	端部	健全	有	N.D.	1050
C7	端部	健全	有	N.D.	350

### 3.2 腐食した PC 鋼線の遅れ破壊モデル

腐食した PC 鋼線を有する既設ポステン T 桁橋の構造安全性を評価するためには、腐食した PC 鋼線の遅れ破壊の影響を信頼性解析に詳細に考慮することが必要である。ここでは、凍結防止剤使用環境下におけるシースの曲上げ部のグラウト充填不良部分において発生した局部腐食の状況に応じた遅れ破壊評価モデルを考慮した。腐食した PC 鋼線素線の破断現象は、ワイブル分布により評価した。ワイブル分布は、活性溶解型応力腐食割れ試験結果<sup>7)</sup>より得られた破断の発生有無データを平均応力  $\sigma_{ave}$  および仮想最大応力  $\sigma_{max}$  について統計解析することにより推定<sup>8)</sup>したものである。遅れ破壊評価に用いる仮想最大応力  $\sigma_{max}$  を式(1)に示す。PC 鋼線の有効緊張力  $\sigma_{pe}$  に局部腐食の修正段差型板状モデル<sup>8)</sup>による弾性応力集中係数  $\alpha_{mod}$  (式(2)) を乗じることで算出した。

$$\sigma_{max} = \sigma_{pe} \times \alpha_{mod} \quad (1)$$

$$\alpha_{mod} = \left[ 1 + \left\{ \frac{t}{\rho} (2.8 \times \frac{B}{b} - 2) \right\}^{0.65} \right] \times \beta \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{pe}$ : PC 鋼線の有効緊張力、 $\alpha_{mod}$ : 修正段差型板状モデルによる弾性応力集中係数、 $\sigma_{max}$ : 仮想最大応力、 $t$ (mm): 段差の高さ、 $\rho$ (mm): 段差の曲率半径、 $L$ (mm): 局部腐食の長さ、 $B$ : 段差が無い部分の部材厚さ、 $b$ : 段差がついた部分の部材厚さ、 $\beta$ : 補正係数 ( $L \leq 0.5$  のとき  $\beta = 1.3536 - 0.0506\rho + 0.02447t - 0.3771L$ ,  $L > 0.5$  のとき  $\beta = 1.1023 - 0.0088\rho - 0.0028t$ )

ワイブル分布の累積分布関数  $F(\sigma)$  は、 $\sigma_T$  を引張応力とし、式(3)で与えられる。また、確率密度関数  $f(\sigma)$  は、累積分布関数  $F(\sigma)$  を  $\sigma$  で微分し式(4)で与えられる。遅れ破

壊評価モデルのワイブル分布の推定結果を図-3および図-4に示す。

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_0}\right)^m\right\} \quad (3)$$

$$f(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} \sigma_T^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_0}\right)^m\right\} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_T$ : 引張応力、 $\sigma_0$ : 尺度 (scale) パラメータ、 $m$ : 形状 (shape) パラメータ

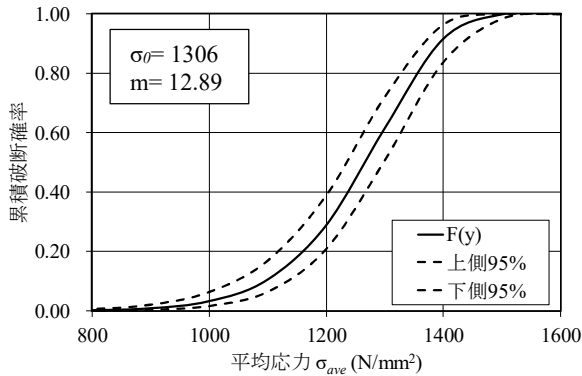


図-3 累積破断確率のワイブル分布による推定結果 (平均応力)

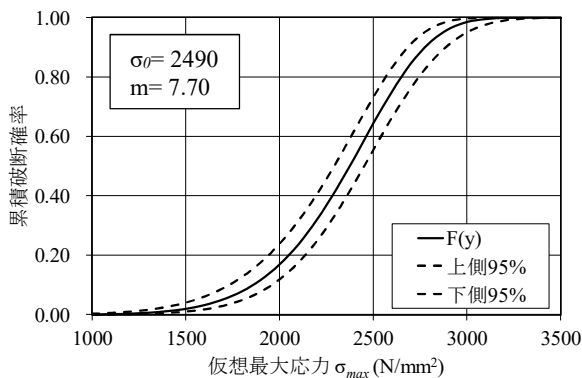


図-4 累積破断確率のワイブル分布による推定結果 (仮想最大応力)

### 3.3 腐食した PC 鋼線の機械的性質低下モデル

凍結防止剤使用環境下において、シースの曲上り部のグラウト充填不良部分が塩害劣化した既設ポステン T 桁橋の構造安全性を詳細に評価するためには、腐食量に応じた PC 鋼線の機械的性質について適切に評価することが重要である。ここでは、塩害劣化した実橋梁 (暮坪陸橋) から得られた腐食した PC 鋼線素線の試験結果<sup>9)</sup>および鴨谷ら<sup>5)</sup>が設定した評価モデルを参考に、腐食した PC 鋼線の機械的性質低下評価モデルを設定した。

最大荷重残存率 1.0 と質量減少率 0%を原点とした回帰式を式(5)に、最大荷重時伸び残存率 1.0 と質量減少率 0%を原点とした回帰式を式(6)および式(7)に示す。この

傾向は、健全状態の PC 桁終局状態 (上縁コンクリートの圧縮破壊) とは異なり、塩害劣化した PC 桁は PC 鋼材の破断により終局状態に至る要因と考えられる。

$$SR_{wi} = -0.0163 \times \Delta w_{wi} + 1 \quad (5)$$

$$ER_{wi} = -0.258 \times \Delta w_{wi} + 1 \quad (0 < \Delta w_{wi} < 2.58) \quad (6)$$

$$ER_{wi} = -0.0039 \times \Delta w_{wi} + 0.345 \quad (2.58 < \Delta w_{wi}) \quad (7)$$

ここで、 $SR_{wi}$ : 各素線の最大荷重残存率、 $ER_{wi}$ : 各素線の最大荷重時伸び残存率、 $\Delta w_{wi}$ : 各素線の質量減少率 (%)

腐食した PC 鋼線の機械的性質低下評価モデルとしては、式(5)から式(7)より最大荷重残存率および最大荷重時伸び残存率の平均値をそれぞれ算定し、さらに変動係数 (最大荷重残存率: 7.1%, 最大荷重時伸び残存率: 34.7%)<sup>5)</sup>を考慮することで、PC 鋼線の機械的性質低下とそのばらつきを考慮した。

## 4. 構造安全性評価手法

### 4.1 発生断面力評価モデル

上部構造物全体の平面格子解析モデルに死荷重と活荷重を載荷することにより、発生断面力を算定した。考慮した活荷重は、設計当時の TL-20 活荷重ではなく、現行の道路橋示方書において示される B 活荷重を採用した。また、超過重量車両の通行を考慮し、変動係数 16.6%<sup>10)</sup>の正規乱数を乗じた値とした。

主桁の断面定数については、著しい塩害劣化を受けた PCT 桁ではコンクリートの浮きやはく落が発生し供用開始時から減少する場合は考えられるが、PC 橋の断面定数は全断面有効として算出するためその減少量は小さいと考えられることから、主桁の断面定数は供用開始時の数値を用いることで安全側の評価とした。

### 4.2 PC 桁の耐荷力算定モデル

塩害劣化した PC 桁の耐荷力を算定するためには、各主ケーブル内の PC 鋼線素線毎に局部腐食を考慮する必要がある。目視により確認できる PC 鋼線の局部腐食はコア削孔位置での PC 鋼線束の側面に限定されることから、PC 鋼線束内部の腐食状況や全体的な腐食の発生状況を把握することは困難である。よって、各 PC 鋼線素線の局部腐食は、主ケーブルの劣化レベル毎に設定した PC 鋼線素線の腐食グレード (図-2) 毎に、局部腐食のパラメータ (質量減少率、断面積減少率、段違い量および曲率半径) について正規分布乱数もしくは対数正規分布乱数により評価<sup>7)</sup>した。さらに素線毎に引張力-ひずみ関係より素線の破断を判定し、それらを主ケーブル毎に足し合わせることで、主ケーブルの引張耐力-ひずみ関係を算定した。

また、平均応力および仮想最大応力は、主ケーブル内での再配分を考慮することとした。PC 鋼線素線において行った促進腐食試験<sup>7)</sup>では、PC 鋼線素線毎に平均 40 個

の局部腐食が生じていた。その試験結果を参考とし、PC 鋼線素線毎に 40 個の局部腐食を設定し、それらの中で最大となる平均応力および仮想最大応力を抽出しその最大値を用いて PC 鋼線素線毎の遅れ破壊発生確率を評価した。

塩害劣化した PCT 桁の載荷試験では、腐食した PC 鋼線の破断により終局に至ることが報告されていることを考慮し、ここでは各 PC 鋼線素線と PC 桁とは完全付着しているものと仮定した。この仮定をすることにより、伸び性能の低下した腐食した PC 鋼線素線についても付着すべりを生じず平面保持の仮定にしたがうものと考慮できるため、部材変形にともないひずみが増加する。ここに、式(5)から式(7)に示す PC 鋼線の機械的性質低下評価モデルを考慮することにより、早期に破断が生じやすいような耐荷力計算モデル<sup>9)</sup>となっている。

また、グラウトが充填されていないアンボンド PC 桁は、グラウト充填された PC 桁と比較し、曲げ耐荷性能が低下することが知られている。グラウト充填不良の主ケーブルを有する断面の PC 桁の曲げ終局耐力は、道路橋示方書<sup>11)</sup>を参考として、グラウトが健全で完全付着していると仮定した設計式で算出した曲げ終局耐力に対して 30%の低減を考慮した。

さらに、供用開始直後の構造安全性についても経年劣化の影響はないものの、実際には設計計算により求めた安全性に対してばらつきが生じている可能性がある。入念な施工が行われ施工的要因が無視できる場合の供用直後 PC 桁における実測曲げ終局耐力の設計値に対する比は、概ね 1.0 以上の範囲でばらつくことが実験により確認されている<sup>12)</sup>。ここでは、入念な施工が行われた PC 橋を対象と考慮することで、供用直後の PC 橋における曲げ終局耐力の設計値に対する比を、平均値 1.07<sup>12)</sup>、変動係数 6.8%<sup>8,12)</sup>として評価した。

#### 4.3 信頼性指標 $\beta$ の評価手法

構造安全性の評価については、理想的にはより正確な手法として破壊確率にて信頼性を評価することが望ましい。しかし、破壊確率による評価方法は、評価のためのデータ収集および構造計算にかなり困難が伴う。本論においては、式(8)および式(9)を用いて信頼性指標  $\beta$  を算定することにより構造安全性を評価した。

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (8)$$

$$M = R - S \quad (9)$$

ここで、 $\beta$  : 信頼性指標、 $\mu_M$  :  $M$  の平均値、 $\sigma_M$  :  $M$  の標準偏差、 $M$  : 安全余裕、 $R$  : 耐力、 $S$  : 断面力

2010 年に改訂された ISO13822<sup>13)</sup>では、既設構造物において評価した信頼性指標を、対策要否判定のための指標として取り込むことを規定しており、既設構造物の維持

管理における構造安全性に関する目標信頼性指標として、構造物崩壊の社会的影響が大きい場合については  $\beta=4.3$ 、社会的影響が非常に小さい場合については  $\beta=2.3$  を規定している。それを踏まえ本論では、既設ポステン T 桁橋における目標信頼性を  $\beta=4.3$  と設定し評価した。なお、従来の研究<sup>14)</sup>において、一般自治体が管理する橋梁の管理水準は  $\beta=2.08$  程度であることが評価されている。

本論では、モンテカルロシミュレーションを採用し、塩害により腐食した PC 鋼線の腐食程度のばらつき、機械的性質低下のばらつき、および破断現象等をモデル化した PC 桁の構造安全性評価を試みた。モンテカルロシミュレーションの試行回数は、概ね収束性が確認できた 1000 回とした。本論で行った構造安全性評価手法の全体フローを図-5 に示す。

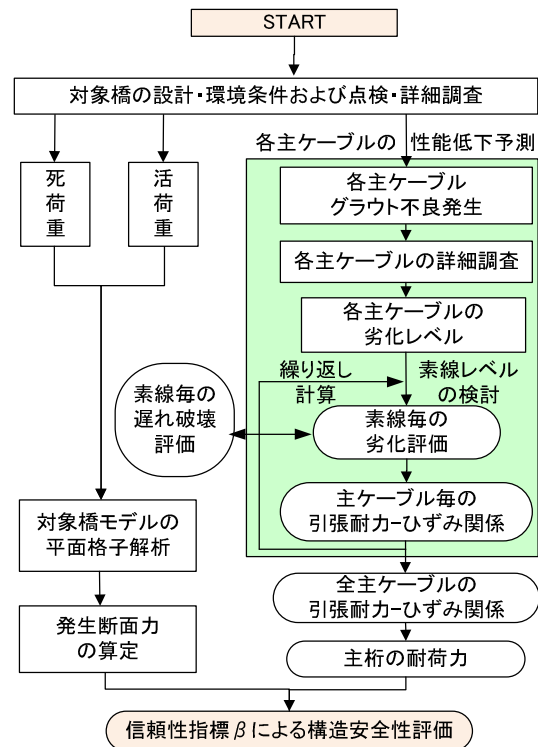


図-5 塩害劣化 PC 橋の構造安全性評価フロー

#### 5. 評価結果と考察

M 橋の詳細調査結果を取りまとめた結果、G6 桁終点側主ケーブルの劣化レベルが最も進行している状況であったことから、ここでは G6 桁終点側の支間 1/4 断面を評価断面として抽出した。評価断面はグラウト充填不良の近傍に位置していることから、安全側を考慮してグラウト充填不良長にかかわらず全てのケーブルをアンボンドとして曲げ終局耐力を算定した。

信頼性評価を行った結果を図-6 に示す。グラウト再充填補修前において遅れ破壊を考慮した場合には、 $\beta=1.1$  と  $\beta=4.3$  を大きく下回る結果となった。

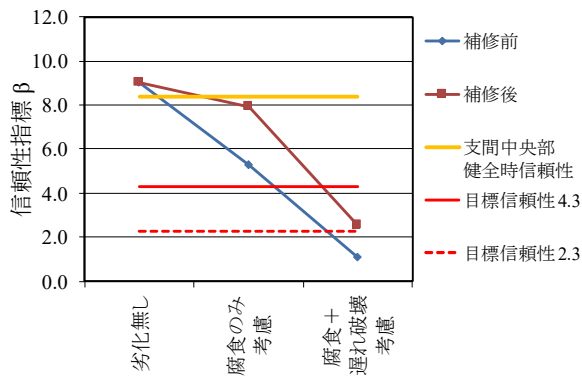


図-6 M橋-G6桁の信頼性指標β

M橋は、点検および詳細調査結果において主ケーブルに著しい損傷が確認されたことから、既に補修対策が実施済みである。補修対策としては、詳細調査にて確認されたグラウト充填不良部に亜硝酸リチウム水溶液を注入することで内部の塩化物イオンを無害化し、PC鋼線に不動態被膜を再形成させ、その後亜硝酸リチウムを添加した補修材を再充填する工法が採用されている。グラウトが再充填されたことによる補修効果として、グラウトが健全で完全付着していると仮定した設計式を適用することが可能となる。グラウト再充填による補修効果を考慮した場合には $\beta=2.5$ と、 $\beta=4.3$ を下回っているものの信頼性は大きく改善された。さらに、グラウト再充填により遅れ破壊抑制効果が期待できる場合には、 $\beta=8.0$ まで改善できることが確認できた。

## 6. まとめ

本検討ではPC鋼線束およびPC鋼線素線毎の凍結防止剤使用環境下における局部腐食の進行モデルおよび局部腐食を有するPC鋼線素線の遅れ破壊評価モデルを用いて、凍結防止剤使用環境下における遅れ破壊を考慮した既設ポステンT桁橋の構造安全性を、信頼性指標 $\beta$ に基づいて評価し、以下の知見を得た。

- (1) 塩害劣化した既設ポステンT桁橋の構造安全性評価においては、PC鋼線の遅れ破壊考慮の影響が大きく、遅れ破壊評価モデルの重要性が指摘される。
- (2) 主ケーブルの補修効果を考慮した場合、信頼性指標 $\beta$ は大きく改善され、遅れ破壊抑制効果が期待できる場合には、目標信頼性である $\beta=4.3$ を上回る可能性が指摘される。

本検討では、局部腐食を模擬したPC鋼線を用いた遅れ破壊に関する実験的検討により得られた知見により推定した遅れ破壊モデルを考慮したが、それはあくまで実験的検討により導いたものであり、実橋梁における腐食したPC鋼線の破断現象等のメカニズムに関する知見が蓄積されるに従い、より信頼性の高い構造安全性評価が

可能になっていくものと思われる。

## 参考文献

- 1) 美濃智広, 戸田想介, 森川英典, 河村睦: 局部腐食を考慮したPC鋼線における遅れ破壊による破断性状に関する実験的検討, 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, Vol.14, pp.687-694, 2014.10
- 2) Walter Podolny, Jr: Corrosion of Prestressing Steels and Its Mitigation, PCI Journal, Vol.37, No.5, pp.34-55, 1992.
- 3) 玉越隆史, 平賀和文, 木村嘉富: PC鋼材の腐食損傷への対応事例—妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査—, 土木技術資料, No.54-5, pp.50-51, 2012.5.
- 4) 松崎裕, 秋山充良, 大木文宏, 中島啓太, 鈴木基行: 塩害環境下にあるコンクリート桁の設計耐用期間にわたる構造安全性評価手法とそのプレテンションPC桁への適用, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.2, pp.147-165, 2010.4.
- 5) 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, Vol.9, pp.131-138, 2009.10.
- 6) 鴨谷知繁, 森川英典, 白川祐太: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.517-522, 2010.
- 7) 美濃智広, 森川英典, 河村睦: 既設PCT桁道路橋のグラウト充填不良部におけるPC鋼線の局部腐食発生性状に関する実験的検討, 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, Vol.16, pp.621-626, 2016.10.
- 8) 美濃智広: 塩害劣化した既設PC道路橋の構造安全性評価および維持管理の信頼性向上に関する研究, 神戸大学大学院工学研究科博士論文, 2016.7.
- 9) 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.
- 10) 阪神高速道路公団: 阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究, 阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会報告書, 1986.12.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編 III コンクリート橋編), pp.142-147, 2012.4.
- 12) 土木学会: 構造物の安全性・信頼性, pp.202, 1976.
- 13) ISO: INTERNATIONAL STANDARD Bases for design of structures - Assessment of existing structures, ISO13822, Second edition, 2010.
- 14) 森川英典, 宮本文穂, 竹内和美: 統計解析に基づく既存コンクリート橋の安全性および寿命評価, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.53-62, 1994.11.