

# 論文 海洋環境下にあるプレテンション PC 桁の構造信頼性評価

松崎 裕\*1・中嶋 啓太\*2・秋山 充良\*3・鈴木 基行\*4

**要旨：**本研究は、海洋環境下にあるコンクリート桁の鋼材腐食による構造性能の低下を考慮して、活荷重作用下でのその設計耐用期間にわたる構造信頼性の評価法を提示するものである。具体的には、プレテンション PC 桁を対象として、海洋からの塩分の飛来から、鋼材腐食の発生、さらにはその後の鋼材腐食の進展、および桁の構造性能の評価に介在する種々の不確定性を系統的に陽に考慮して、設計耐用期間にわたる桁の構造信頼性を評価する手法を構築した。その上で、構造信頼性の設計耐用期間にわたる経時変化の観点から、建設地点における活荷重特性や塩害環境の相違を設計時に適切に考慮することの必要性を定量的に示した。

**キーワード：**塩害, PC 桁, 構造信頼性評価, 腐食, 構造性能低下

## 1. はじめに

著者らは、飛来塩分量の評価から鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度を超過するか否かを判定するまでの一連のプロセスに介在するばらつきを陽に取り込むことで、設計耐用期間内における RC 構造物の鋼材腐食発生確率の評価手法を提案した<sup>1)</sup>。さらには、海洋環境下にある RC 橋脚を対象として、鋼材腐食が生じた RC 橋脚の耐震信頼性評価を行い、鋼材質量減少率と耐震信頼性の関係を示した<sup>2)</sup>。

一方、塩害による鋼材腐食が顕在化しやすい橋梁の部位としては、桁が挙げられる。桁は、死荷重および活荷重によって断面内に引張応力が作用し得る上に、それらの荷重は地震荷重とは異なり、常時あるいは頻繁に作用する荷重である点に大きな特徴がある。従って、そうした荷重の特性を適切に反映できる手法を用いて、設計耐用期間にわたる桁の構造信頼性を評価する必要がある。本研究では、そのための基礎的研究として、活荷重および死荷重評価に係る不確定性から、鋼材の腐食進展および構造性能評価に係る不確定性までを系統的に陽に考慮した桁の構造信頼性評価法の構築を試みる。

## 2. PC 桁の設計耐用期間にわたる構造信頼性評価法

### 2.1 概説

本研究における PC 桁の設計耐用期間にわたる構造信頼性評価法のフローを図-1 に示し、その各過程で考慮されている不確定要因の一覧を表-1 に示す。図-1 において、まず、交通データから活荷重を評価するとともに、寸法誤差などの不確定性を考慮して桁の死荷重を評価し、それぞれの荷重による桁のスパン中央における作用曲げモーメント  $L$  および  $D$  を算定する(図中, Step 1)。

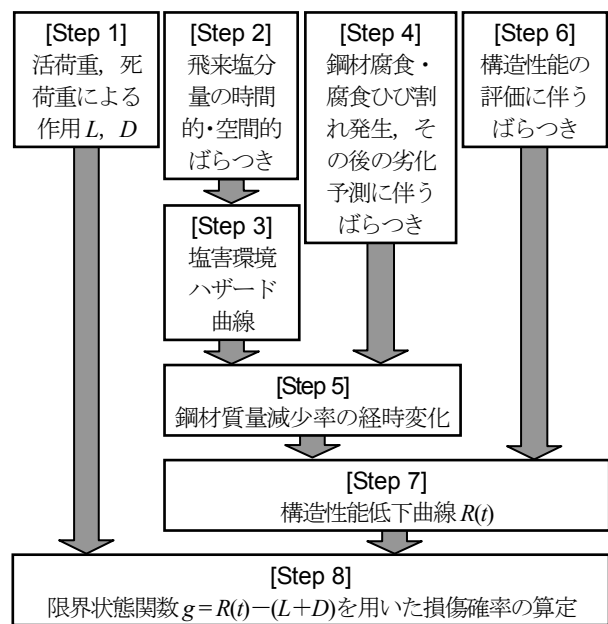


図-1 構造信頼性評価法のフロー

続いて、気象データに基づいて平均風速の変動や海風比率を評価して塩害環境ハザード曲線を作成<sup>1)</sup>し(図中, Step 2 と Step 3, 参考文献 1)や 2)と同様に鋼材腐食発生、腐食ひび割れ発生、およびその後の鋼材腐食進展予測に伴うばらつきの評価(図中, Step 4)を踏まえて鋼材質量減少率の経時変化を算定する(図中, Step 5)。また、構造性能評価において着目する限界状態を定義した上で、その限界状態に対応する限界曲げモーメントの評価に係る不確定性として、鋼材腐食進展に係る限界曲げモーメントの低減、および限界曲げモーメントの算定に係る不確定性を定量化する(図中, Step 6)。その上で、後述する構造性能評価法を用いて、PC 鋼材の降伏に対応する限

\*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻助教 修(工) (正会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

\*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 考慮する不確定要因の一覧

対象	不確定要因	対象	不確定要因
活荷重作用	車重	構造性能	コンクリート圧縮強度
	車両の軸重比率		コンクリートの弾性係数
	車両の軸間距離		PC 鋼材の弾性係数
	車間距離		限界曲げモーメントの評価精度
	車両の横断方向位置		表面塩化物イオン濃度
環境作用	平均風速	塩害劣化	拡散方程式の解析精度
	海風比率		見かけの拡散係数
構造性能	フランジ幅の相対誤差		鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度
	フランジ高さの相対誤差		かぶりの施工誤差
	ウェブ幅の相対誤差		鋼材腐食速度
	ウェブ高さの相対誤差		腐食ひび割れ発生の限界腐食量

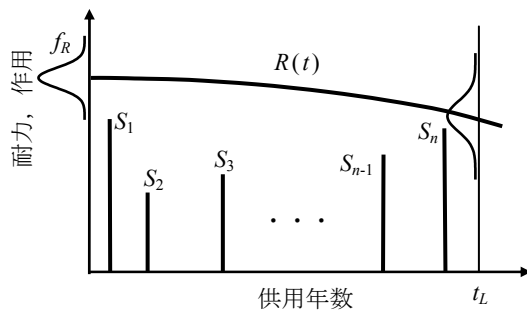


図-2 設計耐用期間にわたる構造信頼性評価

界曲げモーメントの経時変化を表す構造性能低下曲線  $R(t)$  を算定する(図中、Step 7)。以上を踏まえて、照査を行う時点での PC 鋼材の降伏に対応する限界曲げモーメントと、死荷重および活荷重による作用曲げモーメントを比較する式(1)の限界状態関数  $g$  が負になる確率をモンテカルロ・シミュレーション(以下、MCS)により算定する(図中、Step 8)。

$$g(t) = R(t) - (L + D) \quad (1)$$

以上のフローを用いることで、従来、個別に行われてきた構造性能の評価と耐久性の評価を一元化し、さらには、荷重作用および環境作用の地域性を反映させたコンクリート構造物の構造信頼性評価が可能となる。

## 2.2 想定する限界状態

本研究ではプレテンション PC 桁を対象とするが、桁には設計耐用期間内で過大な荷重作用による曲げひび割れが生じ得る。海洋環境下にあるコンクリート構造物に関しては、そうしたひび割れの存在は、鋼材腐食を促進し、さらには耐荷性能の低下を招き得ることから、構造性能および耐久性の両観点から有害である。一方で、限界状態を PC 鋼材の降伏点とすれば、たとえ荷重に起因したひび割れが生じた場合であっても、プレストレス力の存在により、耐久性上無害なひび割れ幅の程度まで、そのひび割れが閉じることが期待される。そこで、本研

究では、PC 桁に想定する構造性能の限界状態を PC 鋼材の降伏点とし、その限界状態を超過する確率、すなわち、荷重作用によって PC 鋼材が降伏する確率について、鋼材腐食進展に伴う PC 鋼材降伏時の限界曲げモーメントの低減を考慮して評価することとする。

## 2.3 構造信頼性評価法

Mori and Ellingwood<sup>3)</sup>は、構造部材の損傷確率を算定する手法を提案している。いま、図-2 に示すように、設計耐用期間  $t_L$  内に、荷重作用  $S$  が時刻  $t_i (i=1, \dots, n)$  に合計  $n$  回生起し、対応する各時刻での構造部材の耐力の経時変化が  $R(t_i) (i=1, \dots, n)$  で表せるとき、設計耐用期間内で着目する構造部材が安全な確率  $L(t_L)$  は式(2)で、損傷確率  $pf$  は式(3)で評価される。

$$L(t_L) = P[R(t_1) > S_1 \cap \dots \cap R(t_n) > S_n] \quad (2)$$

$$pf = 1 - L(t_L) \quad (3)$$

さらに、式(3)で得られた損傷確率  $pf$  について、式(4)により信頼性指標  $\beta$  に変換する。

$$\beta = -\Phi^{-1}(pf) \quad (4)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$  は標準正規分布の累積分布関数である。

Mori and Ellingwood<sup>3)</sup>は、式(3)の算定式を理論的に展開し、損傷確率評価法を提案しているが、その手法では、鋼材腐食進展のばらつきを陽には考慮できない。本研究では、鋼材腐食進展のばらつきは無視できない<sup>1)2)</sup>ことを踏まえ、式(3)に基づいて、MCS で損傷確率を算定することとする。その具体的な考え方は以下の通りである。

まず、荷重作用が設計耐用期間内においてポアソン過程に従って生起すると仮定すると、その生起時刻は設計耐用期間内で一様に分布し、互いに独立な確率変数となる。続いて、設計耐用期間を適当な期間に分割する。この分割期間を本研究では 1 年間とし、その期間内において 2.4(2)で後述する手法により、活荷重による作用曲げモーメントの最大値を評価し、その値に基づいて式(1)の

限界状態関数の値を評価する。各分割期間内での作用曲げモーメントの最大値に基づいて評価することにより、分割期間内の任意の時刻において照査を行ったことと同等になる。以上の処理を全ての分割期間に対して行うことで、設計耐用期間内に損傷する可能性が定量化される。

## 2.4 荷重作用・環境作用のハザード評価法

### (1) 概説

本節では活荷重による作用曲げモーメントの評価法、および環境作用として飛来塩分量の評価法について述べる。地域によって異なる荷重作用や環境作用を確率的に評価し、構造信頼性評価に陽に取り込むことで、地域性を考慮した上で、構造性能と耐久性の各評価の一元化を図った構造信頼性評価が可能となる。

### (2) 活荷重シミュレーションによる作用曲げモーメントの評価

活荷重による作用曲げモーメントの評価を行うにあたり、本研究では図-3に示すフローで自動車荷重列(渋滞列)を作成する。その際、そのような渋滞時の荷重列が1日に2回発生すると仮定を設ける。橋桁上における載荷位置を変更しながら、対象橋梁に評価期間内の発生回数分だけ荷重列を載荷することによって、対象橋梁の支間中央における作用曲げモーメントの最大値を求め、荷重列を変更した MCS により、作用曲げモーメントの最大値の平均値および変動係数を得る。

ここで考慮する不確定性は、車両構成比、車種別重量分布、車間距離分布、横断方向位置分布であり、このうち、車両構成比、車種別重量分布については、参考文献4)から地点毎にその統計量を得る。また、車間距離分布は国道1号線信号交差点での統計データに基づき、平均値2.0m、標準偏差1.0mの対数正規分布とし、下限値0.1m、上限値6.0mとする。横断方向位置分布については、長野県の地蔵橋における調査結果から得られた、車線中央位置からの横ぶれの平均値0.0m、標準偏差0.3mを用いる。なお、参考文献4)に示されている交通データの調査システムBWIMを用いて、図-3に示した各項目のデータを取得すれば、任意の地点の橋梁について同様のシミュレーションを行うことが可能である。

### (3) 塩害環境ハザード曲線

海洋からの飛来塩分量の評価については、参考文献1)の評価手法に基づいて、評価地点の海岸線からの距離に加え、気象データに基づいて当該地域における平均風速および海風比率のデータを取得して評価する。

## 2.5 塩害による腐食を考慮したPC桁の構造性能評価法

### (1) 概説

本節では、塩害によるPC鋼材の腐食の進展を考慮して、前記した構造性能の限界状態であるPC鋼材の降伏に対応する限界曲げモーメントの経時変化を評価する手

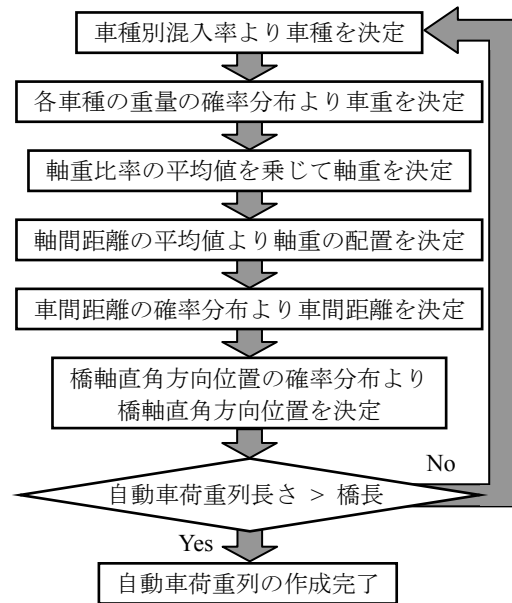


図-3 自動車荷重列の作成フロー

法について、具体的な解析例とともにその概要を述べる。

### (2) PC 桁の構造性能低下評価モデル

本研究で検討対象とする桁の曲げ挙動解析を行う場合、鋼材モデルに鋼材腐食の影響を反映させるには、断面積一定のまま応力-ひずみ関係を変化させる、または応力-ひずみ関係は変化させず、鋼材の断面積を減少させる、といった主に2つの手法がある<sup>5)</sup>。ここでは、PC部材の構造性能は局所的な鋼材の腐食に支配されるとの立場から、前者の手法を採用し、質量減少率、すなわち平均的な断面減少率以上に鋼材の力学的性能が低下するという事実を反映させることとする。具体的には、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に基づいてPC鋼材の応力-ひずみ関係を与え、李ら<sup>7)</sup>の研究に基づき、鋼材質量減少率に応じて弾性係数および降伏応力を変化させる。なお、参考文献7)には、電食試験および乾湿繰返試験に基づいて、弾性係数および降伏応力と質量減少率の関係式がそれぞれ示されているが、構造信頼性評価においては、より実環境に近い乾湿繰返試験に基づく評価式を用いる。

また、鋼材腐食が進展し、腐食ひび割れが発生した場合には、ひび割れが生じた領域のコンクリートの力学的性能も低下する<sup>8)</sup>。そこで、鋼材位置から上下左右にかぶりと同距離の範囲内では、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>によるコンクリートの応力-ひずみ関係の最大応力について、参考文献8)と同様に、PC鋼材の質量減少率に応じて低下させることとする。なお、参考文献8)の手法を用いる際、腐食生成物の体積膨張率は3.0とする。

### (3) 鋼材質量減少率の経時変化の算定法

本研究の検討対象はプレテンションPC桁であり、鋼材とコンクリートの間にシーズが介在するポストテンションPC桁とは異なり、鋼材はコンクリート中に直接配

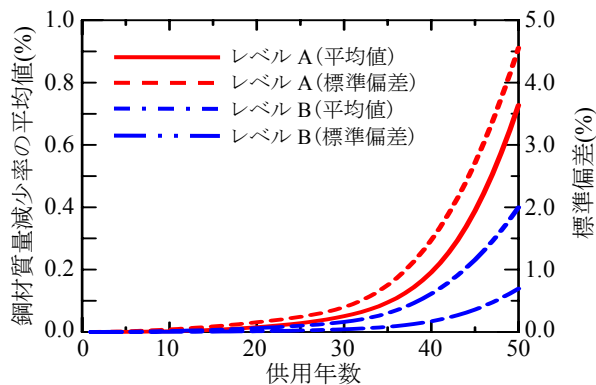


図-4 鋼材質量減少率の経時変化

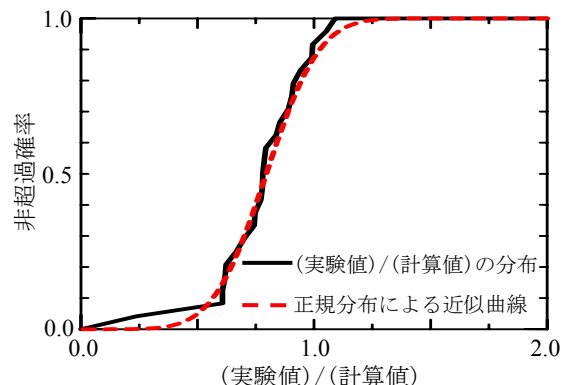


図-5 限界曲げモーメントの評価に係る不確定性

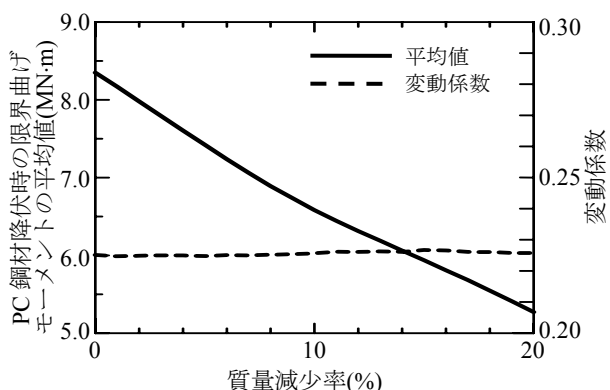


図-6 質量減少率と限界曲げモーメントの関係

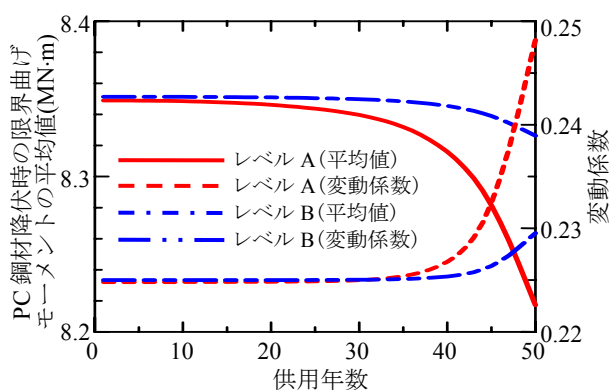


図-7 構造性能低下曲線

置されている。そのため、参考文献 1)や 2)で取り扱った RC 構造物と同様に耐久性評価を行うことが可能である。そこで、飛来塩分量の評価から腐食ひび割れ発生の評価、さらには、その後の鋼材腐食進展評価に伴う種々の不確定性を考慮し、参考文献 2)の手法に基づいて設計耐用期間内における鋼材質量減少率の経時変化およびその不確定性を評価する。

なお、鋼材質量減少率を評価する際に必要となる鋼材の単位表面積当たりの質量については、PC 鋼材を構成する各より線の総表面積に基づいて評価することとし、各より線が一様に腐食していくとの仮定を設ける。

供用年数と鋼材質量減少率の関係について、後述する本研究の解析条件である 2 つの塩害環境で算定した例を図-4 に示す。なお、塩害環境が厳しい方から順に、レベル A およびレベル B としている。図において平均値よりも標準偏差の方が大きいことから明らかなように、鋼材腐食評価に係るパラメータの組み合わせの中で全体の多くは設計耐用期間にわたって全く腐食が生じておらず、同じ供用年数における質量減少率の幅は大きい。また、塩害環境が厳しいほど鋼材腐食がより早期に生じ、その後の鋼材腐食進展をもたらすため、鋼材質量減少率の経時変化の差として塩害環境の相違が反映されている。

#### (4) 構造性能評価における不確定性

PC 鋼材降伏時の限界曲げモーメントの算定の際に考慮すべき不確定性としては、部材の形状寸法の不確定性、

材料特性の不確定性、解析モデルより得られる計算値と実験値との相違の 3 つが考えられる。

桁の形状寸法の不確定性については、参考文献 9)から、ポストテンション PC 桁の寸法の相対誤差の統計量を得た。また、コンクリート圧縮強度の変動係数および PC 鋼材の弾性係数の平均値と変動係数については参考文献 10)に基づいて設定した。なお、コンクリートの弾性係数は、コンクリート圧縮強度に依存して算定した<sup>11)</sup>。また、PC 鋼材の引張強度については公称値を用い、その 0.84 倍<sup>9)</sup>を PC 鋼材の降伏応力として確定的に用いた。

PC 鋼材降伏時の限界曲げモーメントの計算値と実験値との相違については、PC 鋼材を電食で腐食させていて、構造諸元、PC 鋼材の質量減少率、および PC はりの荷重-変位関係が明らかとなっている既往の実験<sup>12)~15)</sup>に基づいて評価した。なお、いずれの実験も内ケーブルのポストテンション部材であり、本研究で対象としているプレテンション部材と同様に、平面保持則を用いた断面解析により妥当に構造性能を評価できると判断した。ただし、載荷前に PC 鋼材が破断していることが確認されている供試体については除外し、鋼材質量減少率が 0%~20.4%の範囲にある 24 供試体を対象とした。また、PC 鋼材を電食で腐食させている実験であることから、PC 鋼材には、ひずみゲージは貼付されていない。そのため、本研究では、文献 12)~15)に示されている荷重-変位関係において、初期剛性の直線と降伏後の接線の二直線の

交点の変位を PC 鋼材降伏時の変位と定義し、その変位における荷重を PC 鋼材降伏時の荷重として実験値を各文献中に示されている図より読み取った。以上の定義に基づいて得られた各実験値について、寸法誤差の平均値<sup>9)</sup>を用いて 2.5(2) で述べた手法で求められる計算値で除すことで、(実験値)/(計算値)の統計量として、平均値 0.795、変動係数 22.5%の統計量を得た。ただし、いずれの供試体も電食試験で鋼材を腐食させているため、弾性係数や降伏応力の低減を考慮する際には、参考文献 7)の電食試験に基づく評価式を用いた。前記したように、平均質量減少率以上の割合で耐荷力が低減するような解析モデルを用いたものの、平均値が 1.0 を下回っており、解析モデルで表現される以上に、電食試験による腐食は実環境下での腐食よりも局所的に生じることの影響が表れているものと考えられる。今後、局所的な腐食の影響を適切に考慮できる解析モデルでの検討を行う余地がある。なお、(実験値)/(計算値)の確率分布形としては、図-5 に示すように、正規分布によって良好に近似された。

以上で得られた構造性能評価の不確定性を考慮するための係数を用いて、後述する本研究の解析対象構造物における鋼材質量減少率と PC 鋼材降伏時の限界曲げモーメントの関係を求めた結果を図-6 に示す。また、図-4 と図-6 に示した各種関係について不確定性を考慮して組み合わせて、供用年数と PC 鋼材降伏時の限界曲げモーメントの関係を評価した結果を図-7 に示す。図-7 に示されるように、塩害環境の相違が構造性能の経時変化に大きな影響を及ぼしているとともに、MCS における一部のサンプルで腐食ひび割れが発生して腐食速度が増加する供用開始後 40 年前後以降では、鋼材質量減少率の変動係数が増加している。

### 3. PC 桁の構造信頼性の経時変化

#### 3.1 概説

本章では、これまでに述べてきた手法を用いて、海洋環境下にあるプレテンション PC 桁を対象として、荷重作用による曲げモーメントが PC 鋼材降伏時の限界曲げモーメントを超過する可能性の経時変化を評価する。

#### 3.2 解析対象構造物

本研究では、参考文献 16)を参考にして、図-8 に示すような断面を持つプレテンション T 型 PC 桁を解析対象とする。各 T 桁には PC 鋼材が 4 本配置されており、設計かぶり厚は 70mm である。なお、コンクリート圧縮強度の設計基準強度は 30.8N/mm<sup>2</sup>であり、実強度の平均値として 40.0N/mm<sup>2</sup>を想定して構造信頼性評価を行う。

#### 3.3 解析条件と荷重・環境作用評価

活荷重特性および塩害環境の相違が PC 桁の構造信頼性の経時変化に及ぼす影響を検討することを目的として、

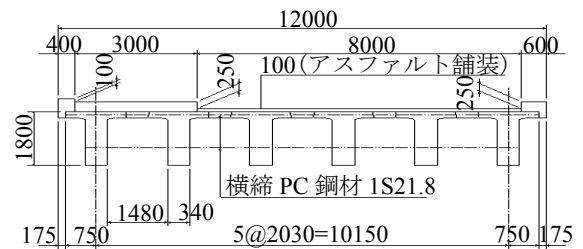


図-8 解析対象 PC 桁の断面図

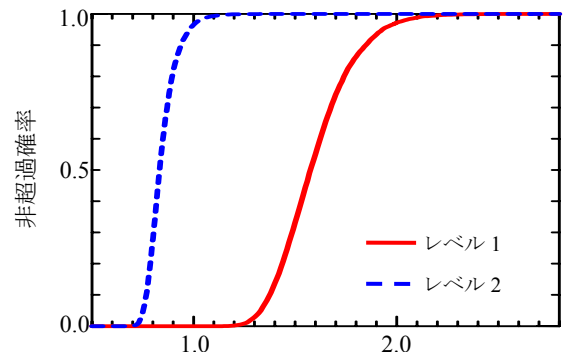


図-9 作用曲げモーメントの1年間最大値の分布

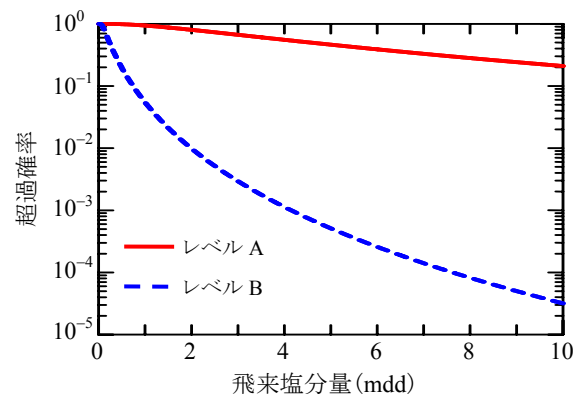


図-10 塩害環境ハザード曲線

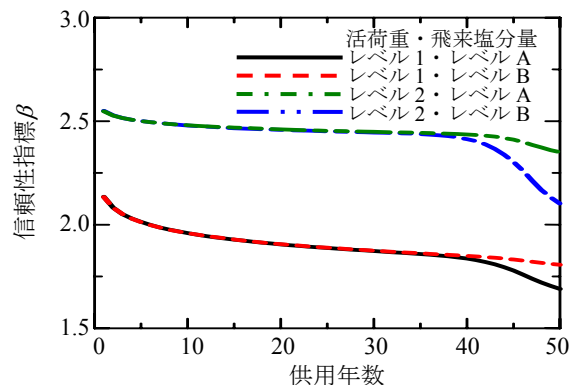


図-11 信頼性指標 $\beta$ の経時変化

活荷重特性および塩害環境についてそれぞれ 2 ケースを設定し、それらの組み合わせで得られる合計 4 つの解析条件を設定した。なお、活荷重による作用曲げモーメントについては、大きいケースから順に、レベル 1、レベル 2 と呼ぶことにする。

作用曲げモーメントの1年間最大値の累積分布を図-9に示す。なお、MCSの試行回数 $N_L$ は、 $N_L=10,000$ 回とした。図から明らかなように、活荷重による作用曲げモーメントには当該地点における車両構成比の違いなどの特性が反映されており、I型極値分布で良好に近似された。また、解析対象とした塩害環境ハザード曲線を図-10に示すが、平均風速、海風比率および海岸線からの距離といった塩害環境の地域性が反映されている。

### 3.4 プレテンションPC桁の構造信頼性の経時変化

信頼性指標 $\beta$ の経時変化を図-11に示す。なお、MCSの試行回数 $N_M$ は、100万回とした。これ以上 $N_M$ を大きくしても式(4)で算定される信頼性指標 $\beta$ が変化しないことを確認している。

図-11から明らかなように、活荷重による作用曲げモーメントの大きさの違いが構造信頼性の大小関係に大きな影響を及ぼしている。また、供用初期は鋼材腐食が生じないため、塩害環境の相違の影響は表れないが、供用年数が経過するのに伴い、塩害環境が厳しいほど、図-7のように鋼材腐食が進展して、より構造性能が低下することから、塩害環境の相違の影響が顕在化している。

本研究では図-8に示す構造諸元に固定して荷重作用や塩害環境の相違が設計耐用期間にわたる構造信頼性に及ぼす影響を検討したが、荷重・環境作用の相違が構造信頼性の経時変化に大きな影響を与えており、荷重作用と環境作用の両者の地域性を適切に考慮して構造物の設計を行うことの必要性が示された。

## 4. まとめ

本研究では、海洋環境下にあるプレテンションPC桁を対象として、活荷重評価および飛来塩分量評価といった荷重・環境作用の評価、鋼材腐食進展評価および構造性能評価に介在する各種不確定性を系統的に陽に考慮して、設計耐用期間にわたる桁の構造信頼性評価法を構築した。その上で、各地点によって異なる活荷重特性および飛来塩分量が桁の構造信頼性の経時変化に大きな影響を及ぼしており、荷重・環境作用の地域性を構造設計において適切に考慮する必要があることを示した。

本論文で提示した手法を用いて桁の構造信頼性評価を行うことで、活荷重・死荷重に対する耐荷性と塩害による鋼材腐食に係る耐久性を同時に考慮した桁の安全性評価が可能となる。この手法を用いることで、設計耐用期間にわたる桁の合理的な設計や維持管理手法の意思決定に際して有用な判断材料を提供できるものと考えられる。

## 参考文献

1) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的

- 研究, 土木学会論文集E, Vol.62, No.2, pp.385-401, 2006.7
- 2) 秋山充良, 松崎裕, 佐藤広和, 内藤英樹, 鈴木基行: 塩害環境下にあるRC橋脚の耐震安全性確保の観点から定めた限界鉄筋腐食量とその耐久設計法に関する確率論的考察, 土木学会論文集E, Vol.64, No.4, pp.541-559, 2008.10
- 3) Mori, Y. and Ellingwood, B.R.: Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.1600-1621, May 2003
- 4) 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理: 道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書—全国活荷重実態調査—, 国土技術政策総合研究所資料, No.295, 2006.1
- 5) 斉藤成彦: 材料の劣化過程ならびに腐食劣化部材の耐荷性能に関する解析的研究, *コンクリート工学*, Vol.45, No.6, pp.55-60, 2007.7
- 6) 土木学会: *コンクリート標準示方書[設計編]*, 2008
- 7) 李翰承, 野口貴文, 友澤史紀: 引張主筋の腐食したRC梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究, *日本建築学会構造系論文集*, No.56, pp.43-50, 1998.4
- 8) Coronelli, D. and Gambarova, P.: Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams: Modeling Guidelines, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.130, No.8, pp.1214-1224, Aug. 2004
- 9) 土木学会: *構造物の安全性・信頼性*, 1976
- 10) 秋山充良, 土井充, 松中亮治, 鈴木基行: 構造系の信頼性を考慮したRC橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算, *土木学会論文集*, No.718/V-57, pp.1-17, 2002.11
- 11) 日本道路協会: *道路橋示方書・同解説 I 共通編*, 2002
- 12) Minh, H., Mutsuyoshi, H., Taniguchi, H. and Niitani, K.: Experiments on the behavior of post-tensioned concrete beams deteriorated by corrosion, *Proceedings of Japan Concrete Institute*, Vol.25, No.1, pp.875-880, Jul. 2003
- 13) Minh, H., Mutsuyoshi, H., Konno, Y. and Niitani, K.: Experimental investigation on chloride-induced corrosion in post-tensioned concrete beams, *Proceedings of Japan Concrete Institute*, Vol.26, No.1, pp.1071-1076, Jul. 2004
- 14) Minh, H., Mutsuyoshi, H., Nakamura, N. and Hai, N.D.: Influence of grouting conditions on deterioration of post-tensioned prestressed concrete beams, *Proceedings of Japan Concrete Institute*, Vol.28, No.1, pp.773-778, Jul. 2006
- 15) Minh, H., Mutsuyoshi, H. and Niitani, K.: Influence of grouting condition on crack and load-carrying capacity of post-tensioned concrete beams due to chloride-induced corrosion, *Journal of Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.21, pp.1568-1575, Jul. 2007
- 16) 土木学会: *土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[道路橋編]*, *コンクリートライブラリー*, No.117, 2005