

## 土木構造物の信頼性評価に関する現状と課題

### 1. 土木構造物のライフタイムにわたる安全性評価の基本

土木構造物は、鋼・コンクリート・土といった多種多様な材料から構成されており、構造種別・構造形式も多岐にわたる。各構造物が受ける作用の生起頻度や継続時間も作用の種類によって大きく異なる。

こうした多種多様な作用を受ける土木構造物のライフタイムにわたる安全性評価に共通する基本は、ライフタイムにわたる任意の時刻で、各構造物の目標性能に対応した限界状態が生起しないことを照査することである。すなわち、着目した限界状態に対応する耐力  $R$  (コンクリート部材のひび割れ発生曲げモーメント・終局変位、土のせん断強度など) がライフタイムにわたって常に作用  $S$  (コンクリート部材の最大作用曲げモーメント・最大応答変位、土の作用せん断応力など) を上回っていることを照査することになる。さらには、将来的に構造物に作用する各種荷重や環境作用の大きさは確定的に定められるものではなく、照査に当たって用いる作用の評価モデルや、材料強度等が本来的に有するばらつきを考慮しなければ、作用が耐力を上回り、限界状態が生起する可能性を適切に評価できない点に注意が必要である。

任意の時刻  $t$  において安全であることを照査するには、式(1)の限界状態式が正の値であればよい。

$$g(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

式(1)を用いれば、時刻  $t_1, t_2, \dots, t_n$  のいずれにおいても安全である確率  $p_L$  は次のように表現できる。

$$p_L = \text{Prob.} [g(t_1) > 0 \cap \dots \cap g(t_n) > 0] \quad (2)$$

土木構造物のライフタイムにわたる安全性を担保するためには、ライフタイムにわたって常に耐力  $R$  が作用  $S$  を上回っていることが要求されるが、式(1)と式(2)に示すように、そのためには着目した限界状態に対応する耐力  $R$  と作用  $S$  の不確定性を考慮した時間変化の評価が必要である。

ここで、耐力  $R$  の経時変化特性を考えると、コンクリート構造物や鋼構造物中の鋼材の腐食現象に起因する耐力低下の場合には、環境作用に伴う鋼材腐食の進展によって耐力が長い時間をかけて徐々に低下していく。それに対して、土構造における斜面崩壊のような現象の場合には、降雨に伴って有効応力が低下し、結果的にせん断抵抗が減少することが斜面崩壊のトリガーになるなど、鋼材の腐食減少に比べると相対的にごく短期間における耐力低下の評価が重要となる。このように、対象構造物や対象とする作用の特性により、耐力  $R$  の経時変化特

性は大きく異なるが、着目する限界状態に対応する耐力  $R$  の評価に影響を与える環境作用等を抽出し、それら環境作用等と耐力  $R$  の相互作用モデルを構築しなければならない点に関しては、考え方は共通である。

こうした相互作用モデルの構築はまだ研究途上ではあるが、以下では、一つの例として、塩害環境下にあるコンクリート桁を対象として、その考え方を具現化した研究<sup>1)</sup>を紹介する。前記したように、環境作用が耐力  $R$  の低下に及ぼす影響は、飛来塩分量評価に基づく環境ハザードに対応した PC 鋼材降伏時の曲げモーメントとして具体化されている。また、対応する作用  $S$  としては、活荷重の実態調査に基づく活荷重ハザードが反映されている。

### 2. 土木構造物のライフタイムにわたる安全性評価の枠組みの一例

#### (1) 概説

土木構造物のライフタイムにわたる安全性評価の枠組みの一例として、文献1)で提案されてい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の流れを図-1に示す。図-1は、a) 塩害環境ハザードに基づいて、時系列で低下する構造性能を評価する Step 1～Step 4、b) 活荷重シミュレーションに基づいて、コンクリート桁に作用する曲げモーメントの最大値として活荷重ハザードを評価する Step 5、c) 任意の供用年数までに構造性能を上回る荷重作用が生じる確率に基づき、構造安全性を定量化する Step 6 と Step 7 の大きく3つに大別される。以下では、a)～c)についてそれぞれ詳述する。

#### (2) 塩害環境ハザードを考慮した構造性能評価

図-1の Step 1～Step 4は、構造物の建設地点における塩害環境ハザードを考慮して鋼材腐食進展評価を行い、生じ得る鋼材腐食量に対応する構造性能を時系列で評価する部分である。

まず、図-1の Step 1において、構造物に到達する飛来塩分量の時間的・空間的ばらつきを評価し、飛来塩分量の大小を塩害環境ハザード曲線として定量化する。ここで、塩害環境ハザード曲線は、震央距離の増加とともに地震動強度が減衰することのアナロジーから、海岸線からの距離に応じて飛来塩分量が減衰することに基づいて評価される<sup>2)</sup>。海洋からの飛来塩分の供給量は、海風比率(海岸線に直交する方向の両側45度の範囲から吹く海風の時間比率)や平均風速によって説明しており、加えて海岸線からの距離を考慮して飛来塩分量の回帰式を作成している<sup>2)</sup>。なお、これら3つの説明変数のうち、不確定要因として取り扱っているものは平均風速であり、

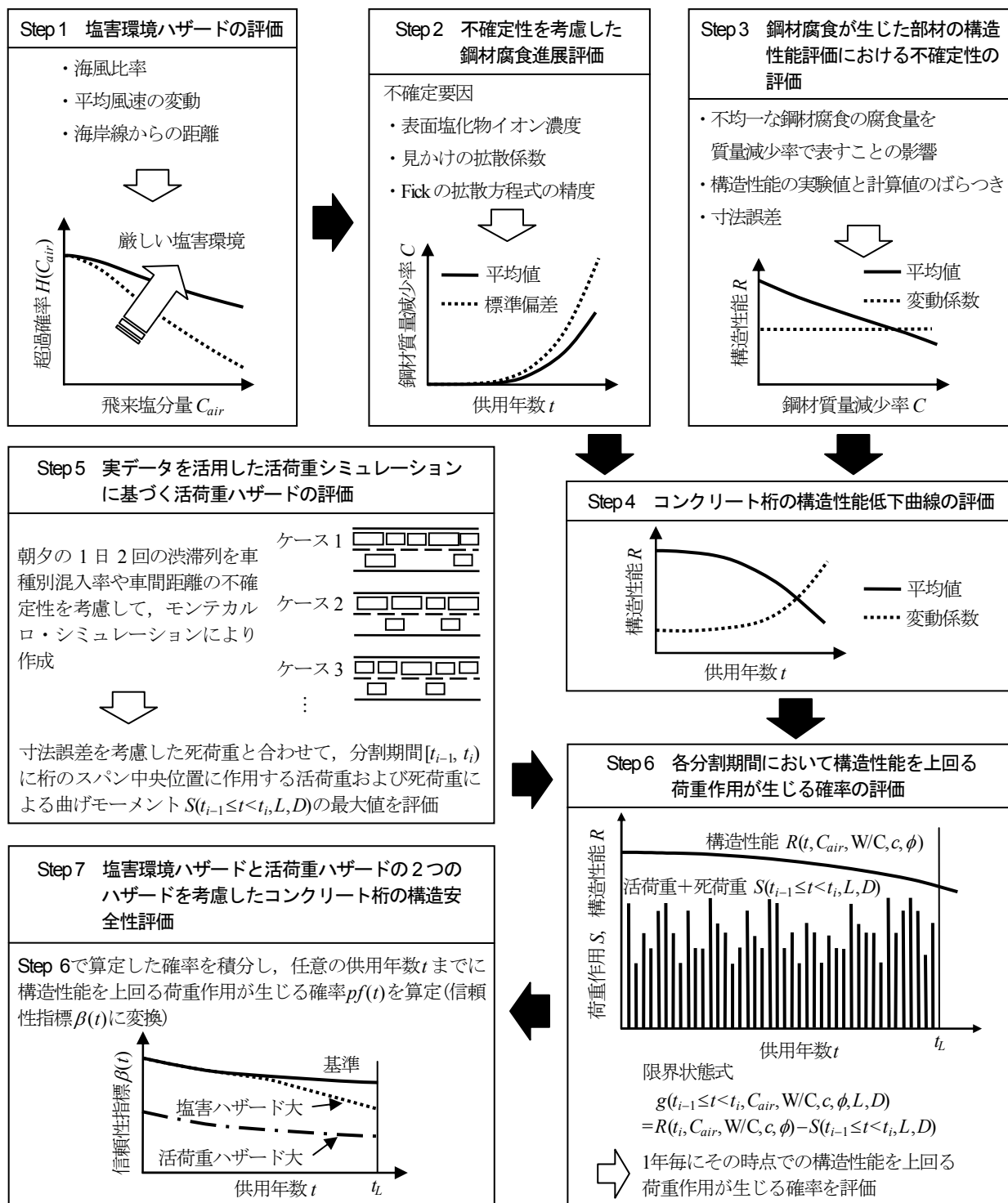


図-1 活荷重と塩害環境の2つのハザードを考慮したコンクリート桁の構造安全性評価手法の流れ

3年間平均風速の変動が考慮されている。ここで、山田ら<sup>3)</sup>は、構造物表面の位置と海岸線の方向の関係に応じて構造物表面に到達する飛来塩分量には相違があることを指摘しており、こうした構造物材の位置の違いによる飛来塩分量の相違は構造物材内での鋼材腐食進展の空間的ばらつきを生む一つの要因であると考えられる。しかしながら、現状では、こうしたマイクロな塩害環境の相違について不確定性を含めて定量的に評価することは困難である。ここでは、塩害環境ハザードの評価に際して、

構造物材の位置による飛来塩分量の相違は考慮に入れず、同一の地域で、海岸線からの距離が同じであれば、どの部材も同量の飛来塩分の作用を受けると仮定する。

続いて、図-1のStep 2において、Step 1で評価された塩害環境ハザード  $H(C_{air})$  を踏まえて、任意の供用年数  $t$  における鋼材質量減少率  $C$  を算定する。その際、鋼材腐食進展評価に係る種々の不確定性を考慮して、供用年数と鋼材質量減少率の関係を評価する。具体的には、かぶり  $c$  や水セメント比  $W/C$  によって鋼材腐食発生時

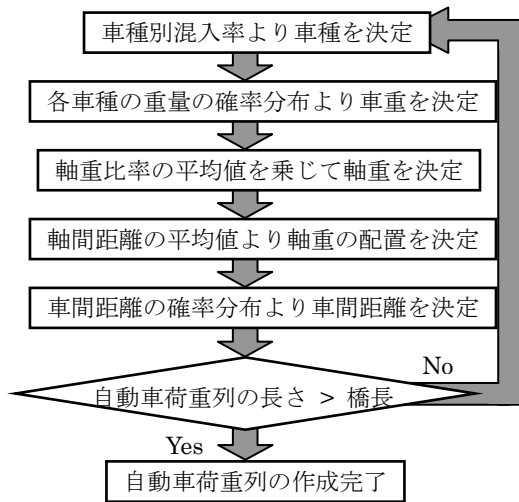
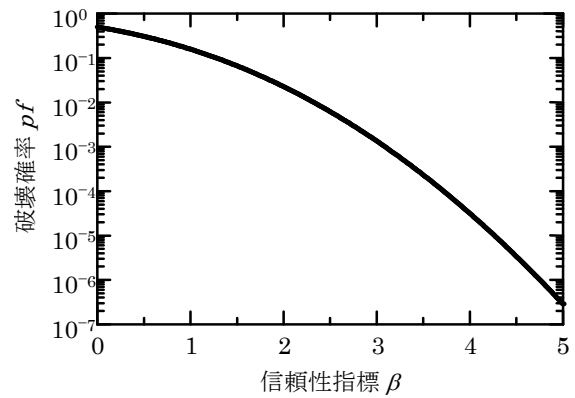


図-2 自動車荷重列の作成フロー

間が異なることや、PC鋼材の径 $\phi$ やかぶり $c$ によって腐食ひび割れ発生時の限界腐食量が異なることなどが反映される。なお、鋼材腐食量の指標としては鋼材質量減少率(ある区間内の平均的な鋼材断面減少率)を用いる。こうした鋼材腐食量を指標として用いるのは、新設構造物の設計段階では、将来、部材内に生じる鋼材腐食量の不均一さを予測することは困難であり、現状はある区間内での平均的な断面減少率といったマクロな鋼材腐食量の情報を予測できる程度であることを踏まえたものである<sup>4)</sup>。なお、鋼材腐食の空間分布を直接的に取り扱わず、区間内の平均的な鋼材腐食量のばらつきとして評価することは、前記したように、飛来塩分量評価において、同一の構造物内における局所的な飛来塩分量の相違や、鋼材腐食進展の空間的ばらつきを考慮に入れていないことに対応している。

図-1のStep 3では、鋼材腐食が生じた部材の構造的な性能評価に係る不確定性を同定する。ここでは、鋼材腐食が構造的な性能に及ぼす影響を評価する際に、鋼材質量減少率を指標として用いざるを得ず、鋼材腐食の空間的ばらつきを取り扱えないことに起因する構造的な性能評価結果の不確定性が反映される。さらには、鋼材質量減少率が既知の状態であっても、構造的な性能の計算値と実験値には差が生じるため、こうした構造解析法に依存したばらつきが考慮されるほか、寸法誤差が構造的な性能に及ぼす影響なども評価される。

図-1のStep 4では、Step 3において評価された鋼材質量減少率と構造的な性能の関係において、鋼材質量減少率にStep 2での供用年数と鋼材質量減少率の関係を対応付けることにより、鋼材腐食進展評価および構造的な性能評価における不確定性を考慮した上で、任意の供用年数 $t$ における構造的な性能 $R$ が塩害環境ハザードの大小に応じて定量的に評価される。従って、Step 1~Step 4までをまとめると、構造的な性能 $R$ は、次のように供用年数 $t$ 、塩

図-3 破壊確率  $pf$  と信頼性指標  $\beta$  の関係

害環境ハザードの指標である飛来塩分量 $C_{air}$ 、そして鋼材腐食発生時間や腐食ひび割れ発生時間を決定するパラメータである $W/C$ 、 $c$ 、 $\phi$ の関数として表記できる。

$$R = R(t, C_{air}, W/C, c, \phi) \quad (3)$$

なお、式(3)に示した関数では、 $W/C$ 、 $c$ 、 $\phi$ の3つのパラメータのみを用いているが、一例に過ぎない。より多くの適切なパラメータを用いた精緻な解析モデルに基づくことで、構造的な性能評価における解析の高度化が可能である。特に、荷重除荷後に曲げひび割れが残留することを許容する部材を対象とする場合には、残留する曲げひび割れが材料劣化や構造的な性能の低下に及ぼす影響を考慮できる解析モデルを用いて構造的な安全性を評価する必要がある。これらの解析例の作成は、今後の課題である。

### (3) 活荷重シミュレーションに基づく活荷重ハザードおよび死荷重による作用曲げモーメントの評価

図-1のStep 5では、まず、設計耐用期間 $t_d(=N$ 年)を1年毎に全体で $N$ 分割し、各分割期間1年間において、活荷重によってコンクリート桁のスパン中央に作用する曲げモーメント $L$ の最大値を評価する。なお、作用曲げモーメントの最大値の評価期間を1年間としたのは、構造的な安全性評価における分割期間を1年間とすれば、後述する設計耐用期間内の信頼性指標の値が収束することを踏まえたものである。作用曲げモーメントの評価に際しては、通勤ラッシュに伴って1日に朝夕2回の交通混雑が生じることを想定し、一方向は渋滞列、他方向は自由走行列とする。その上で、参考文献5)による実データに基づいて評価した車種別混入率や、車間距離等の活荷重評価に関係する各不確定要因を考慮に入れて、分割期間1年間での渋滞の発生回数分だけモンテカルロ・シミュレーション(以下、MCS)を行い、図-2に示す流れで任意の自動車荷重列を作成する。MCSで用いる具体的なパラメータは後述する。このように、対象橋梁に評価期間内の渋滞発生回数分だけ自動車荷重列を載荷することによ

て、対象橋梁の各桁のスパン中央における作用曲げモーメントの最大値を求め、自動車荷重列を変更した MCS により、作用曲げモーメントの最大値の累積分布として活荷重ハザードを評価する。なお、これら作用曲げモーメントの評価においては、桁の任意の位置に作用する活荷重の各主桁への荷重分配を適切に評価できる手法を用いる。

以上をまとめると、分割期間 $[t_{i-1}, t_i)$ における活荷重による作用曲げモーメントの最大値 $L_{\max, i}$ は次のように算定される。

$$L_{\max, i} = \max L(t_{i-1} \leq t < t_i, r_w, w, l_c) \quad (4)$$

ここに、 $t_j = j$ (年)であり、 $t_N = t_L$ である。また、 $r_w$ は車種別混入率、 $w$ は各車種の重量、 $l_c$ は車間距離である。

また、時間的に変動しない死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 $D$ についても、寸法誤差を考慮した断面積に基づいて算定する。

$$D = D(\gamma_c, A_b, l_b) \quad (5)$$

ここに、 $\gamma_c$ はコンクリート桁の単位体積重量、 $A_b$ は寸法誤差を考慮したコンクリート桁の断面積、 $l_b$ はコンクリート桁のスパンである。

#### (4) 構造安全性評価手法

以上で述べた塩害環境ハザードを考慮した任意の供用年数における構造性能と、活荷重シミュレーションに基づいて評価された活荷重および死荷重による各分割期間内での作用曲げモーメントの最大値の確率分布に基づいて、任意の供用年数における構造安全性を定量化する。まず、図-1の Step 6 では、各分割期間の終了時点 $t_i$ での構造性能 $R(t_i, C_{air}, W/C, c, \phi)$ と、分割期間 $[t_{i-1}, t_i)$ における活荷重によって桁のスパン中央に作用する曲げモーメントの最大値 $L_{\max, i}$ を用いることで、当該分割期間内に一度でも、構造性能を上回る荷重作用が生じるか否かを次の限界状態式に基づいて評価する。

$$g_i = g(t_{i-1} \leq t < t_i, C_{air}, W/C, c, \phi, L, D) \\ = R_i - S_i \quad (6)$$

$$R_i = R(t_i, C_{air}, W/C, c, \phi) \quad (7)$$

$$S_i = S(t_{i-1} \leq t < t_i, L, D) = L_{\max, i} + D \quad (8)$$

従って、図-1の Step 7 として、供用開始から任意の供用年数 $t_i$ までに、コンクリート桁の限界状態を一度でも超過する確率 $pf(t_i)$ は、次のように評価できる。

$$pf(t_i) = 1 - \text{Prob.}[g_1 > 0 \cap \dots \cap g_i > 0] \quad (9)$$

式(9)で評価された $pf(t_i)$ を信頼性指標 $\beta(t_i)$ に変換する

ことで、構造安全性を定量的に評価する。

$$\beta(t_i) = -\Phi^{-1}\{pf(t_i)\} \quad (10)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数である。

式(10)で得られる破壊確率 $pf$ と信頼性指標 $\beta$ の関係を図-3に示す。なお、厳密には、式(10)は式(6)で与えられる限界状態式が線形かつ全ての確率変数が正規分布に従う場合に成立する。しかし、1) 信頼性解析で得られる破壊確率や信頼性指標は、安全性の程度を定量化したものであり、その差の大小を示す相対的な指標であること、2) コンクリート構造の場合、鋼材量や断面寸法を変化させたとき、その変化量と信頼性指標の変化量の対応が良いこと<sup>6)</sup>(言い換えると、確率 $pf(t_i)$ が10倍異なる構造でも、その鋼材量や断面寸法はその差ほど相違がない)、を勘案して、ここでは信頼性指標を用いることにした。

以上の流れに基づいて構造安全性評価を行うことで、塩害環境ハザードを考慮した構造性能評価と、活荷重ハザードに基づく荷重作用評価が統合され、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が可能となる。

#### 参考文献

- 1) 松崎裕, 秋山充良, 大木文宏, 中嶋啓太, 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.
- 2) 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.
- 3) 山田文則, 細山田得三, 下村匠: 構造物表面に到達する飛来塩分量の数値解析による予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1041-1046, 2007.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 長尚: 安全性指標の有効性について, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 459-466, 1989.