

## 第 1 1 章 環境作用

### 11.1 一般

[REQ] 環境作用は，検討対象とする構造物に生じる劣化現象の種類，および用いる予測手法に応じて，適切に与えるものとする．

#### 【解説】

構造物の耐久性とは，環境作用による経年劣化に対する抵抗性と考えられることができる．構造物の耐久性は，従来，良質な材料，施工，維持管理により確保する考え方が一般的であり，安全性や使用性等のその他の性能のように設計段階で実現される保有性能を定量的に予測し，要求性能との間で照査する枠組みとはなっていなかった．したがって，耐久性を定量的に予測する必要はなく，その劣化因子となる環境作用の定量化も必要とされなかった．しかし，近年，設計段階で構造物の耐久性照査を行なうとする方向に設計の枠組みが移行しつつある．土木学会コンクリート標準示方書では，平成 11 年耐久性照査型施工編より耐久性照査が取り入れられた<sup>1)2)</sup>．

環境作用による構造物の劣化現象の種類は多様である．また，劣化現象の大半は構造物を構成している材料の変質・変化現象であるので，鋼構造物，コンクリート構造物とでは，考慮しなければならない劣化現象の種類が異なる．たとえば，飛来塩分による鋼材の腐食は鋼構造物，コンクリート構造物のいずれにおいても問題となるが，中性化，凍害などはコンクリート構造物においてのみ生じる．したがって，設計において考慮すべき環境作用は，構造物の建設地点だけでなく，構造物の構成材料の種類にも依存することとなる．

これら種々の劣化現象は，本来独立に進行するのではなく，多くの場合相互に関連しながら並行して進行する．たとえば，コンクリート中への塩分の侵入とコンクリートの中性化は相互に影響しながら進行し，いずれもコンクリート中の鋼材の腐食の原因となる．また，凍害によるコンクリート表面の劣化はコンクリート中への塩分の侵入を容易にする．しかし，照査が簡便に行えることと，工学的にこの方法で十分な場合が多いことから，たとえばコンクリート構造物の場合，塩害，中性化，凍害などに個々の劣化現象に分解して考える方法がとられている．なお，近年では，劣化予測技術の進歩により，複数の劣化現象の相互作用を考慮しつつ，構造物の劣化過程を精度よく予測できるようにもなっている．表 1 は一般的な構造物に生じる劣化現象と作用因子，構造物にもたらす影響を示したものである．

表 1 鋼構造物およびコンクリート構造物の代表的な劣化現象

| 構造物の種類    | 劣化現象     | 作用因子               | 構造物への影響           |
|-----------|----------|--------------------|-------------------|
| 鋼構造物      | 塩害       | 海からの飛来塩分，<br>凍結防止剤 | 鋼材の腐食             |
|           |          |                    | コンクリート中の鉄筋<br>の腐食 |
| コンクリート構造物 | 中性化      | 二酸化炭素，乾湿           | ひび割れ，かぶりの剥<br>離   |
|           | 凍害       | 低温，乾湿              |                   |
|           | 化学的侵食    | 侵食性物質              |                   |
|           | アルカリ骨材反応 | (反応性骨材)，水分         |                   |

検討する劣化現象ごとに考慮すべき環境作用の種類が異なる。また、同じ劣化現象に対しても、用いる劣化予測法により与えるべき環境作用の精度、形式等が異なる。たとえば、コンクリート中への塩分の侵入を予測する際に、精緻な予測モデルを用いる場合は、時間空間の分解能の高い飛来塩分の情報が必要となる。また、温度や風速など必要とする情報の種類も多くなる。一方、簡便な予測モデルでは構造物の環境条件をコンクリートの表面塩化物イオン濃度に代表させる方法がとられている。

なお、表1は、主に構造物本体の劣化を対象としたものである。実際の構造物の維持管理では、たとえば鋼構造物における塗装、コンクリート構造物における表面保護工などのように、劣化を防止する補修補強が施されることがある。その場合、塗装の劣化に応じて塗替えを定期的に行なうなど、その補修補強材の劣化対策が実質的にはその構造物の維持管理計画上重要となることも多い。しかし、補修補強材の劣化現象は材料によって多種多様であり、個別の材料や工法ごとに考えるべきものであるため、ここでは取り上げていない。

## 11.2 塩害に関する環境作用

### 11.2.1 一般

- (1)[REQ] 本指針は、塩害（外来塩分に起因する構造物中の鋼材の腐食）が構造物の耐久性に影響する場合において、その進行予測に用いる環境の影響を設定する方法を提供する。
- (2)[REQ] 構造物の塩害に関する環境作用は、構造物の立地する地域、構造物周辺の局所的条件に応じて適切に設定することが必要である。

#### 【解説】

##### (1)について

外来塩分として、海より風に輸送されて構造物に飛来する塩分と、道路への凍結防止剤の散布により供給される塩分がある。ここではこのうち、自然界からの構造物への作用として考えることができる前者を対象とする。後者は、凍結防止剤の散布頻度や散布量と関係づけて別途評価することができる。

コンクリート構造物では塩害の原因として、外来塩分に加えて、骨材に由来して打設当初よりコンクリート中に存在する内在塩分がある。通常、内在塩分は使用材料の選別の段階で規制される。

##### (2)について

飛来塩分に影響する気象、海象条件より、冬季季節風により輸送される塩分が卓越する地域、台風により輸送される塩分が卓越する地域などにわが国を区分することができる。

構造物周辺の局所的条件とは、海塩粒子の発生する海岸から対象構造物までの水平距離、高さ、および、構造物が谷にあるか、海岸から山を越えた場所にあるかなどの地形条件である。

### 11.2.2 作用因子

- (1)[REQ] 塩害に関する環境作用の作用因子は、構造物の表面に飛来する塩分量である。
- (2)[REQ] 塩害に関する環境作用の作用因子は、構造物への飛来塩分量調査の結果、構造物の表面塩分量の調査の結果に基づき設定することが望ましい。

#### 【解説】

##### (1)について

飛来塩分量は、単位時間、単位面積当たりに飛来した塩化物イオン量を(mdd=mg/dm<sup>2</sup>/day)の単位で通常表される。個別の構造物への飛来塩分の実測は、構造物に土研式塩分捕集箱を設置して行なわれることが多い。概ね月単位で飛来塩分量を集計し、月ごとの飛来塩分量を一年分描けば、その構造物への飛来塩分の特徴を把握することができる。短時間での飛来塩分の計測には、ガーゼ法が用いられることがある。

##### (2)について

塩分捕集箱やガーゼ法で測定されるのは、構造物に到達した塩分の累積量である。実構造物では、降雨による洗い流しの影響などにより、到達した塩分がすべて構造物表面に付着し続けるわけではない。構造物の表面に実際に付着している塩分量も実測されている。鋼構造物の場合、表面塩分量は精度よく実測することができる。しかし、コンクリート構造物の場合、表面に付着している塩分と、表面近傍のコンクリート中に侵入している塩分を区別して測定することが難しい。このため、実験的には表面近傍のコンクリート中の塩化物イオン濃度を表面塩化物イオン濃度としたり、表面からの深さ方向の塩化物イオン濃度分布曲線の外挿により表面塩化物イオン濃度を求めたりしている。

### 11.2.3 作用モデル・作用効果

- (1)[REQ] 塩害に関する環境作用の作用モデルは、作用の実態に即した適切なモデルを設定しなければならない。
- (2)[REQ] 塩害に関する環境作用の作用モデルは、構造物の塩害の進行予測に用いる予測手法に応じて適切なモデルを設定しなければならない。

#### 【解説】

##### (2)について

塩害に関する環境作用は、構造物の塩害の進行予測に用いる予測手法に応じていくつかのモデル化の方法がある。

もっとも簡易な方法は、劣化予測を行なうことなく、構造物の立地する地域区分に応じて、コン

クリート構造物の最小かぶりやひび割れ幅の限界値などの設計に用いる諸元を決める方法である。日本道路協会道路橋示方書・同解説<sup>3)</sup>では、わが国の地域を塩害の影響の度合いに応じて3つに区分し、さらに海岸からの距離に応じて、塩害に対する対策区分を設定する方法が示されている。

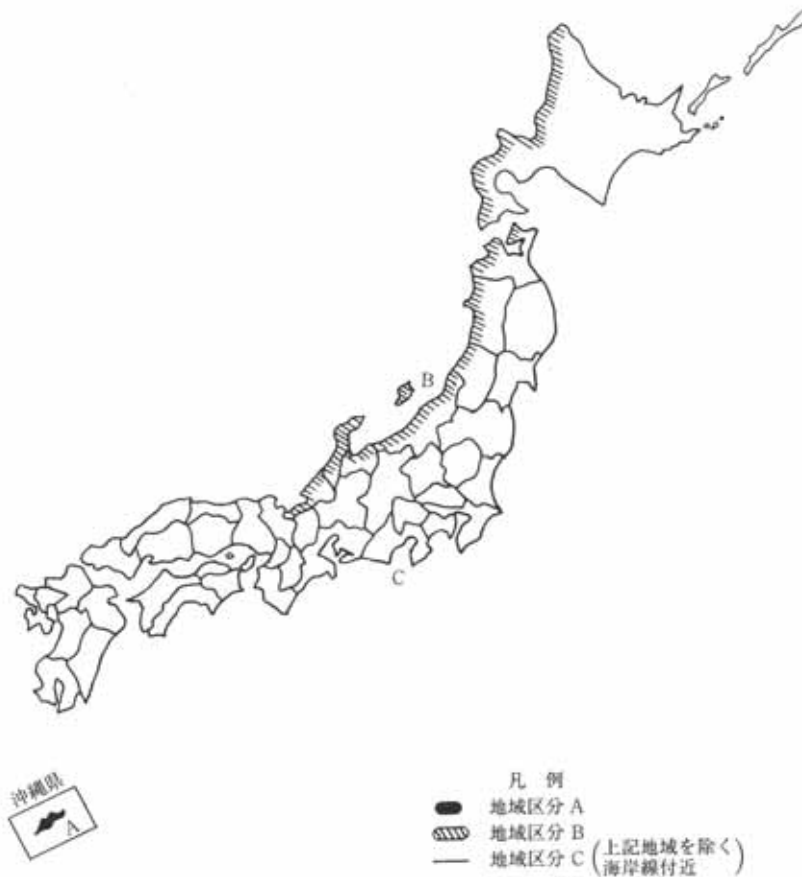


図1 塩害の影響の度合いの地域区分<sup>3)</sup>

定量的な劣化の進行予測を行なう場合、その境界条件として塩害に関する作用を与える方法がとられる。土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>では、コンクリート中における塩化物イオンの移動を拡散モデルにより予測する方法がとられている。

$$\text{コンクリート中 } (x>0) \text{ において, } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{コンクリート表面 } (x=0) \text{ において, } C = C_0 \quad (2)$$

ここに、 $C$ ：コンクリート中における塩化物イオン濃度、 $D$ ：コンクリート中における塩化物イオン拡散係数、 $t$ ：時間、 $x$ ：コンクリート表面からの深さ方向の距離、 $C_0$ ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度である。(1)(2)より、鋼材腐食発生に影響するコンクリート中の鋼材位置における塩化物イオン濃度 $C_d$ は、拡散方程式の解である次式により表される。

$$C_d = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (3)$$

ここに、 $c$ ：かぶりである。なお、 $\operatorname{erf}(s)$ は誤差関数であり、 $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$ で表される。

境界条件であるコンクリート表面における塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) は、対象構造物の飛来塩分量

等の環境条件に応じて設定する。土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>では、 $C_0$ の標準的な値として海岸からの距離に対応させた以下の表が掲載されている。

表2 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

| 飛沫帯  | 海岸からの距離 (km) |     |      |     |     |
|------|--------------|-----|------|-----|-----|
|      | 汀線付近         | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 1.0 |
| 13.0 | 9.0          | 4.5 | 3.0  | 2.0 | 1.5 |

海岸付近の高さ方向については、高さ 1m が汀線からの距離 25m に相当すると考えて  $C_0$  を求めてよい。

ただし、式(1)(2)の拡散モデルによりコンクリート中の塩化物イオンの移動を表した場合、実験的には表面塩化物イオン濃度  $C_0$  にはコンクリートの配合の影響は完全には分離できない。また、降雨による洗い流しの影響なども含んだ形で  $C_0$  を評価していることになる。

塩害による劣化予測をより精度よく行おうとする研究も行われている。その中で、数値流体力学の手法を応用して、構造物に飛来する塩分量を数値シミュレーションにより予測する試みもなされている<sup>4)</sup>。鋼構造、コンクリート構造の両分野で平行してこのような方法が検討されていることは興味深い。これらの方法では、解析の入力情報となるのは、波高、砕波帯における海塩粒子発生量、風向、風速、構造物周辺地形などである。まだ、実構造物の設計、維持管理には実用されていないものの、近い将来取り入れられるようになるものと考えられる。

### 11.3 中性化に関する環境作用

#### 11.3.1 一般

- (1)[REQ] 本指針は、コンクリートの中性化が構造物の耐久性に影響する場合において、その進行予測に用いる環境の影響を設定する方法を提供する。
- (2)[REQ] 中性化に関する環境作用は、構造物周辺の局所的条件に応じて適切に設定することが必要である。

#### 【解説】

##### (1)について

中性化は大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象である。これにより、コンクリート中の鋼材が腐食しやすい状態になる。

中性化の直接の因子となるのはコンクリートに接する大気中の二酸化炭素濃度であるが、その地域差は僅少であるので考慮する必要がない。むしろ中性化の進行に影響を及ぼすのは、コンクリートの含水率であり、これに影響する環境作用としては相対湿度や日射などである。

##### (2)について

コンクリートの中性化に関しては、地域差よりもむしろ対象構造物あるいは対象部位のコンクリートの含水状態を考慮することの方が重要である。たとえば、対象部位が屋外に面しているか、屋内に面しているか、日当たりのよい南側であるか、日陰の北側であるかによって、中性化進行速度は異なる。

#### 11.3.2 作用因子

- (1)[REQ] 中性化に関する環境作用の作用因子は、相対湿度や日射などコンクリートの含水状態に影響を及ぼす因子である。
- (2)[REQ] 中性化に関する環境作用の作用因子は、構造物中のコンクリートの含水状態の調査結果に基づき設定することが望ましい。

#### 11.3.3 作用モデル・作用効果

- (1)[REQ] 中性化に関する環境作用の作用モデルは、作用の実態に即した適切なモデルを設定しなければならない。
- (2)[REQ] 中性化に関する環境作用の作用モデルは、構造物の中性化の進行予測に用いる予測手法に応じて適切なモデルを設定しなければならない。

#### 【解説】

土木構造物は一般に屋外にあり降雨等の影響によりコンクリートの含水率が比較的高いので、中性化が問題となることは少ない。

土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>では、ルート $t$ 則に基づく中性化進行予測が取り入れられているが、環境作用としては構造物の立地条件を大まかに考慮しているに過ぎない。

$$y_d = \alpha \beta_e \sqrt{t} \quad (4)$$

ここに、 $y_d$ ：中性化深さ、 $\alpha$ ：中性化速度係数、 $t$ ：時間、 $\beta_e$ ：環境作用の程度を表す係数。一般に、乾燥しにくい環境、北向きの面などでは 1.0、乾燥しやすい環境、南向きの面などでは 1.6 とする。

## 11.4 凍害に関する環境作用

### 11.4.1 一般

- (1)[REQ] 本指針は、コンクリートの凍害が構造物の耐久性に影響する場合において、その進行予測に用いる環境の影響を設定する方法を提供する。
- (2)[REQ] 構造物の凍害に関する環境作用は、構造物の立地する地域、構造物周辺の局所的条件に応じて適切に設定することが必要である。

#### 【解説】

##### (1)について

凍害とはコンクリート中の水分の凍結膨張，融解の繰返しにより，表層部コンクリートが徐々に劣化する現象である。

凍害の進行は，日射，外気温などコンクリート中の水分を凍結させる作用のほか，その構造物への水分の供給の状況の影響も受ける。

##### (2)について

コンクリート中の水分を凍結させる作用の程度は，その地域の気象と対応している。対象構造物への水分の供給の程度は，雨，雪，川水，海水，湧水などの水の供給源，水に直接浸る，表面を伝わる，ひび割れなどの欠陥部を経由するなどの供給形態によって異なる。

### 11.4.2 作用因子

- (1)[REQ] 凍害に関する環境作用の作用因子は，構造物中の水分を凍結させる作用と構造物への水分の供給の状況である。
- (2)[REQ] 凍害に関する環境作用の作用因子は，構造物周辺の最低気温，年間凍結回数，水分の供給状況の結果に基づき設定することが望ましい。

### 11.4.3 作用モデル・作用効果

- (1)[REQ] 凍害に関する環境作用の作用モデルは，作用の実態に即した適切なモデルを設定しなければならない。
- (2)[REQ] 凍害に関する環境作用の作用モデルは，構造物の耐凍害性の照査方法に応じて適切なモデルを設定しなければならない。

#### 【解説】

##### (2)について

コンクリートの凍害に関する検討は、一般に、劣化の進行を予測し限界値以下に収めるのではなく、供用される環境下で凍害を生じない耐凍害性を有しているかの判定を行なう方法がとられる。

土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>では、構造物の気象条件、断面、露出状態（水分の供給状況）に応じて耐凍害性を満足するコンクリートの相対動弾性係数が掲載されている。

表3 凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値， $E_{min}$  (%)

| 気象条件<br>断面<br>構造物の露出状態                 | 凍結融解がしばしば繰り返される場合  |       | 氷点下の気温となることがまれな場合  |       |
|--|--------------------|-------|--------------------|-------|
|  | 薄い場合 <sup>2)</sup> | 一般の場合 | 薄い場合 <sup>2)</sup> | 一般の場合 |
| (1)連続してあるいはしばしば水で飽和される場合 <sup>1)</sup> | 85                 | 70    | 85                 | 60    |
| (2)普通の露出状態にあり、(1)に属さない場合               | 70                 | 60    | 70                 | 60    |

1)水路、水槽、橋台、橋脚、擁壁、トンネル覆工等で水面に近く水で飽和される部分および、これらの構造物の他、桁、床版等で水面から離れてはいるが融雪、流水、水しぶき等のため、水で飽和される部分など。

2)断面の厚さが20 cm程度以下の部分など。

地域の凍害の危険度の判定方法としては、建築分野で用いられている凍害危険度マップ<sup>6)</sup>の有用性が高い。



図4 凍害危険度の分布図<sup>6)</sup>



## 11.5 化学的侵食に関する環境作用

### 11.5.1 一般

- (1)[REQ] 本指針は，コンクリートの化学的侵食が構造物の耐久性に影響する場合において，その進行予測に用いる環境の影響を設定する方法を提供する．
- (2)[REQ] 化学的侵食に関する環境作用は，構造物周辺の局所的条件に応じて適切に設定することが必要である．

#### 【解説】

##### (1)について

化学的侵食とは，コンクリートが外部から化学物質の影響を受け，セメント硬化体を構成する水和生成物に変質あるいは分解して結合能力を失ってゆく劣化現象である．化学的侵食の原因となる化学物質には，酸類，アルカリ類，塩類，油類，腐食性ガスなど多岐にわたる．

##### (2)について

一般的な環境において化学的侵食が問題になることは少ない．温泉地や酸性河川流域に建設された構造物，下水道関連施設，化学工場，食品工場等の特殊な条件下での構造物では，化学的侵食を考慮しなければならない場合がある．

### 11.5.2 作用因子

- (1)[REQ] コンクリートの化学的侵食に関する環境作用の作用因子は，構造物周辺における当該化学物質の濃度である．
- (2)[REQ] 化学的侵食に関する環境作用の作用因子は，構造物建設地点周辺の化学物質の濃度の調査結果に基づき設定することが望ましい．

### 11.5.3 作用モデル・作用効果

- (1)[REQ] コンクリートの化学的侵食に関する環境作用の作用モデルは，作用の実態に即した適切なモデルを設定しなければならない．
- (2)[REQ] コンクリートの化学的侵食に関する環境作用の作用モデルは，構造物の化学的侵食の進行予測に用いる予測手法に応じて適切なモデルを設定しなければならない．

## 11.6 アルカリ骨材反応に関する環境作用

[REQ] コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する環境作用は、検討対象とする構造物の水分の供給の状況に応じて、適切に与えるものとする。

### 【解説】

コンクリートのアルカリ骨材反応は、コンクリートに反応性骨材を使用した場合、供用中の構造物に水分が供給されることにより生じる。

コンクリートのアルカリ骨材反応は、使用骨材の選定段階で発生の可能性のあるものを排除し、構造物にアルカリ骨材反応による劣化が生じないようにすることが望ましい。したがって、新設構造物の場合、コンクリートのアルカリ骨材反応による構造物の劣化の進行を設計段階において予測し、限界値以下に収めるといった方法は通常採られない。また、既存構造物において、アルカリ骨材反応が認められた場合には、水分の供給を遮断することにより進行を抑制するなど、適切な維持管理対策を施すべきである。

### 参考文献

- 1) (社)土木学会，平成 11 年版コンクリート標準示方書 [ 施工編 ] - 耐久性照査型 - ，1999
- 2) (社)土木学会，2002 年制定コンクリート標準示方書 [ 施工編 ]，2003
- 3) (社)日本道路協会，道路橋示方書・同解説 ( 共通編・コンクリート橋編 )，2002
- 4) (社)日本コンクリート工学協会，コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会報告書，2004
- 5) (社)日本コンクリート工学協会，コンクリート診断技術'06，2006
- 6) 日本建築学会，建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5，鉄筋コンクリート工事，1997