

# コンクリートの基礎講座

## ⑥コンクリート基礎編・コンクリートの耐久性（その1：中性化，塩害）

\*斜体文字は「用語の解説」に記載しました。

### コンクリートの耐久性

コンクリート（コンクリート構造物）の耐久性とは、コンクリートの機能や性能の低下の経時変化に対する抵抗性のことです。具体的には、気象作用、化学的浸食作用、機械的摩耗作用、その他の劣化作用に対して長期間にわたって耐えられるコンクリートの性能のことです。

コンクリートの劣化現象には、中性化、塩害、化学的浸食、アルカリシリカ反応などのような化学的な劣化現象と、凍害、すりへり作用などの物理的な劣化現象が挙げられます。これらの劣化現象は、単独で進行する場合もありますが、複数の劣化作用が複合して進行することが多いと言われています。

今回は、上記の劣化現象の中から、最も代表的な「中性化」、「塩害」、「凍害」、「アルカリシリカ反応性」について概説します。

### コンクリート（鉄筋コンクリート）の特徴

コンクリートの耐久性を理解するためには、あらかじめコンクリートの基本的な特徴を理解しておく必要があります。耐久性に関連するコンクリートの主な特徴は以下のとおりです。

- ①鉄筋コンクリートは、性質の異なる鉄筋とコンクリートで構成される複合材料である。
- ②コンクリートは、長期にわたって水和反応が進行する。水和反応は内在する化学物質

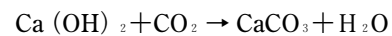
だけでなく、外部から侵入する化学物質や環境条件の影響を受ける。

- ③打設直後のコンクリートはアルカリ性であり、鉄筋（鋼材）の腐食を防止している。
- ④コンクリートは連続した微細な空隙を有する多孔質な物質であり、この空隙を通して気体（酸素、二酸化炭素）、イオン（塩化物イオン、アルカリ金属イオン、硫酸イオン）、水分などの浸透や移動が生じる。

### コンクリート（コンクリート構造物）の中性化

#### 1) コンクリートの中性化

中性化とは、硬化したコンクリート中の水酸化カルシウム  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  が大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の作用によって、徐々に炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) になり、コンクリートのアルカリ性が低下 (pHが低下) する現象のことで、次式によって表されます。



なお、水酸化カルシウムと二酸化硫黄との反応や、水酸化カルシウムと二酸化窒素との反応に伴うアルカリ性の低下も中性化といわれています。

#### 2) コンクリートの中性化の判断

コンクリートの中性化は、フェノールフタレイン溶液をコンクリート表面に噴霧し、赤紫色に呈色しない部分を中性化部分と判断します。フェノールフタレイン溶液は、pH10以上で赤紫色に呈色

表1 コンクリートの中性化深さと劣化現象の関係

状態	中性化深さとかぶり厚さの関係	劣化の状態
潜伏期	中性化深さは小さく、鉄筋位置まで達していない。	外観上の変化なし。
進展期	中性化深さが一部鉄筋位置まで達している。	少数の錆び汁が見られる。 少数の腐食ひび割れが発生する。
加速期	中性化深さがかなり鉄筋位置まで達している。	多数の錆び汁が見られる。 多数の腐食ひび割れが発生する。 部分的に、かぶりコンクリートの浮き・剥離・剥落が発生する。
劣化期	中性化深さが鉄筋位置まで半分以上達している。	多数の錆び汁が見られる。 多数の腐食ひび割れが発生する。ひび割れ幅が大きい。 多数のかぶりコンクリートの浮き・剥離・剥落が発生する。 変位・たわみが大きい。

するため、pHが10を下回ると中性化と判断されま  
す。従って、一般的な中性（pH7程度）とは、判断  
が異なるので注意する必要があります。なお、水  
酸化カルシウムのpHは12～13程度です。

### 3) 中性化がコンクリートの性能に及ぼす影響

コンクリートの中性化は、コンクリート（コン  
クリート構造物）の劣化現象の一つですが、コン  
クリートが中性化しても直ちにコンクリート（コ  
ンクリート構造物）の機能や性能が低下するわけ  
ではありません。コンクリートの中性化に伴って  
組織が緻密になり、コンクリート強度や硬さが増  
加する場合があります。しかし、中性化が鉄筋位  
置まで達すると、鉄筋の不動態被膜が破壊され、  
水や酸素の浸透によって鉄筋が錆び、構造物の耐  
久性が損なわれます。なお、コンクリートの中性  
化深さ（コンクリート表面から赤紫色部分までの

距離）と劣化状況の関係は概ね表1のとおりです。

### 4) 中性化の特徴及び中性化に影響を及ぼす各種要因

コンクリートの中性化（中性化速度）は、コンク  
リートの配（調）合条件、使用材料、環境条件など  
によって異なります。中性化の特徴及びコンクリ  
ートの中性化に及ぼす主な要因は次のとおりです。

- ・密実なコンクリートほど中性化の進行が遅くな  
る。従って、水セメント比が小さく、施工上の  
欠陥がないコンクリートほど中性化速度は遅く  
なる。
- ・同一水セメント比で比較すると、普通ポルトラ  
ンドセメントに比較して混合セメントを使用し  
たコンクリートの方が中性化速度は速くなる。
- ・中性化速度は、期間（年）の平方根に比例する。
- ・環境条件として、一般に二酸化炭素濃度が高い

#### 用語の解説

##### 不動態被膜

ある条件下で金属表面に反応生成物の被膜が形成され、不動態の状態（金属が腐食されず安定である状態）になることがあ  
ります。その被膜を不動態被膜と呼びます。鉄筋コンクリートにおいては、コンクリートがアルカリ性であることが不動  
態被膜を形成する条件です。

##### 中性化速度

コンクリートが中性化する速度のことです。中性化深さXと時間tの間には、 $X=A\sqrt{t}$ の関係があり、Aを中性化速度係数  
と呼びます。

##### 水セメント比

コンクリート中のセメントに対する水の質量比又は百分率（W/C）のことです。一般に水セメント比が小さい（セメント  
に対して水の割合が小さい）ほど、コンクリート強度が高く、密実になります。

##### はつり箇所

コンクリート内部の状態を確認するために、たがね等でコンクリート表面を削りとった箇所のことです。



写真1 コンクリートコアの中性化状況

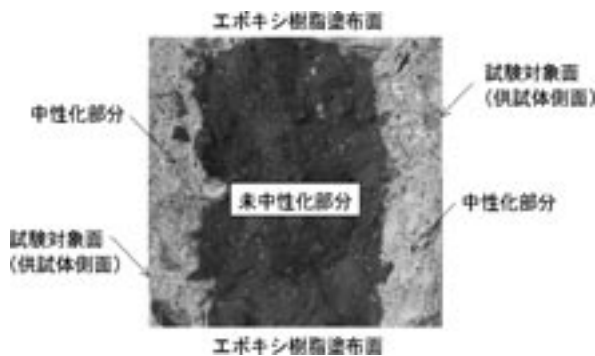


写真2 コンクリート供試体の中性化状況

て2つの規格が規定されています。JIS A 1152 (コンクリートの中性化深さの測定方法) は、はつり箇所やコンクリート構造物から採取したコンクリートコアの中性化深さの測定方法に関

ほど、また、温度が高いほど中性化速度は速い。従って、屋外側に比較して屋内側のコンクリートの方が中性化は早く進行する。

- ・コンクリートの含水率が高い（湿った状態）と中性化の進行は遅くなる。従って、水中構造物や地中構造物では、中性化はほとんど進行しない。なお、著しく乾燥している場合も中性化速度は遅くなる。
- ・タイル、石張りなどの仕上げは、中性化の進行を遅らすうえで有効である。
- ・中性化の進行に伴い、コンクリート中に固定された塩化物イオンが遊離し、コンクリート内部へ移動して濃縮される。従って、中性化の進行は、後述する塩害を助長する場合が多い。

### 5) 中性化に関する試験方法

現在、JIS（日本工業規格）には、中性化につい

する規定です。また、JIS A 1153（コンクリートの促進中性化試験方法）は、工事現場や試験室で作製したコンクリート供試体を二酸化炭素濃度を高めた条件下（CO<sub>2</sub>濃度：5±0.2%）に暴露し、コンクリートの中性化に対する抵抗性を試験する方法です。通常は、コンクリートの種類や使用材料等が異なる場合のコンクリートの中性化深さ（中性化速度）を相対的に比較する方法として利用されています。

なお、自然環境と促進条件との関係は概ね把握されていますが、実際の構造物の中性化の状況と促進中性化試験結果は必ずしも整合しないという研究報告もあります。

参考として、コンクリートコアの中性化状況を写真1に、促進中性化試験を行った供試体の中性化状況を写真2に示します。

#### 用語の解説

##### コンクリートコア

コンクリート構造物から試験用として抜き取った円柱状の試験体のことです。抜き取りには専用のコアドリルやコアビットを使用します。なお、供試体の直径は、一般に粗骨材の最大寸法の3倍を超える寸法とします。

##### アノード部

金属が腐食する際に酸化（酸素と化合すること）する部分（陽極）のことです。

##### カソード部

金属が腐食する際に還元（酸化化合物から酸素を奪うこと）する部分（陰極）のことです。

##### かぶりコンクリート

鉄筋表面を覆う部分のコンクリートのことです。「かぶり（厚さ）」を参照して下さい。

##### かぶり（厚さ）

鉄筋表面とこれを覆うコンクリート表面までの最短距離のことです。土木では「かぶり」、建築では「かぶり厚さ」といいます。

## コンクリート構造物の塩害

### 1) 塩害とは

塩害とは、コンクリート中に存在する塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) の作用により、コンクリートの鉄筋 (鋼材) が腐食し、コンクリート構造物に損傷を与える現象のことです。

打設直後のコンクリートは、アルカリ性が高いため、コンクリート中の鉄筋 (鋼材) の表面には、緻密な不動態被膜が形成されています。しかし、コンクリート中に塩化物イオンが一定量以上存在すると、不動態被膜が部分的に破壊され、鉄筋は腐食しやすい状態になります。不動態被膜が破壊されると、鉄筋表面の電位が不均一となり、アノード部 (陽極) とカソード部 (陰極) が生じて電流が流れ、鉄筋の腐食が始まります。鉄筋の腐食に伴って生じた錆の体積は、もとの鉄筋の数倍になるため、その膨張圧によって鉄筋に沿ってコンクリートにひび割れが発生します。ひび割れが発生すると、酸素と水分の供給が容易となり、鉄筋の腐食が加速し、かぶりコンクリートの剥落や鉄筋の断面積の減少により部材の耐力が低下します。この一連の現象 (図1, 写真3参照) が塩害です。

### 2) 塩害の対策 (その1)

コンクリート中の鉄筋 (鋼材) の腐食は、酸素や水分が供給されやすく、塩化物イオンが存在する場合に著しくなります。従って、コンクリート中の鉄筋 (鋼材) の腐食を防止するためには以下の事

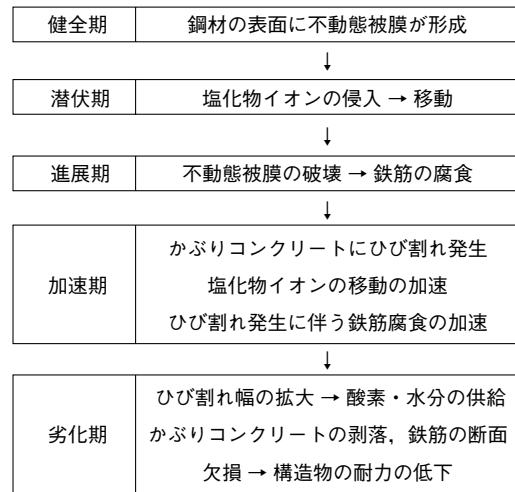


図1 コンクリート構造物の塩害の進行状況

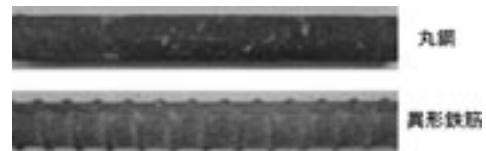


写真3 鉄筋の発錆状況の一例

項について配慮する必要があります。

- ・コンクリート製造時に混入する塩化物イオン量を制限する。[塩化物含有量の制限]
- ・外部からコンクリートへの塩化物イオンの侵入・浸透を抑制する。[仕上げ材の使用, コンクリートの密実性の向上, かぶり (厚さ) の確保, ひび割れ幅の制御]
- ・鉄筋表面への塩化物イオンの到達を抑制する。[エポキシ樹脂塗装鉄筋, 亜鉛めっき鉄筋等の使用]
- ・コンクリート内部の鉄筋の電位を抑制する。[電

## 用語の解説

### エポキシ樹脂塗装鉄筋

塩化物イオンによる鉄筋の腐食を防止するために、エポキシ樹脂を塗装した防食鉄筋の一種です。

### 亜鉛めっき鉄筋

防食のために鉄筋の表面に亜鉛をめっきした鉄筋のことです。めっきの方法には、熔融亜鉛めっきと電気亜鉛めっきの二種類があります。

### 電気防食

電気によって金属の腐食を防止することです。正確には電気化学防食といえます。外部から微小電流を流す方法と、犠牲電極を用いる方法があります。

表2 各種使用材料の塩化物イオン量(塩化物量)の上限値

使用材料	塩化物イオン量(塩化物量)の規格値	対象規格
ポルトランドセメント	塩化物イオン(Cl)：0.02%以下	JIS R 5210
砂*	塩化物量(NaCl)：0.04%以下	JIS A 5308 附属書1
練混ぜ水	塩化物イオン(Cl)：200ppm以下	JIS A 5308 附属書3
化学混和剤	塩化物イオン(Cl)：0.02%以下(Ⅰ種) 0.02~0.20%(Ⅱ種)，0.20~0.60%(Ⅳ種)	JIS A 6204

\* 0.04を越すものについては、購入者の承認を必要とする。ただし、その限度は0.1とする。プレテンションプレストレストコンクリート部材に用いる場合は、0.02%以下として購入者の承認があれば0.03%以下とすることができる。

気防食(外部電源方式，流電陽極方法]

・混和剤として防せい剤を使用する。[防せい効果を有する混和剤(JIS A 6205に適合)の使用]

### 3) 塩害の対策(その2)

コンクリートに塩化物イオンが侵入する要因には、使用材料(海砂，セメント，混和剤，練り混ぜ水)に起因する場合(内在塩化物イオン)と，海水飛沫や海からの飛来塩化物などがコンクリート表面から浸透する場合(外来塩化物イオン)とがあります。

内在塩化物イオンについては，塩害を防止するためにJIS A 5308(レディーミクストコンクリート)やJASS5では塩化物含有量(塩化物イオン総量)を0.30kg/m<sup>3</sup>以下(購入者の承認を受けた場合には0.60kg/m<sup>3</sup>以下)と規定しています。また，表2に示すように，関連JISには各種使用材料の塩化物イオン量(塩化物量)の上限値が規定されています。

なお，塩化物量(NaCl)と塩化物イオン量(Cl)との関係は次式のとおりです。

$$\begin{aligned} & \text{塩化物イオン量}(\%) \\ & = \text{塩化物量}(\%) \times 35.5 / (35.5 + 23) \end{aligned}$$

$$= \text{塩化物量}(\%) \times 0.607$$

ここに，35.5：塩素(Cl)の原子量

23：ナトリウム(Na)の原子量

一方，外来塩化物イオンについては，土木学会コンクリート標準示方書[施工編]では，照査の判定基準として，1.2kg/m<sup>3</sup>を鋼材腐食発生限界濃度としています。

なお，外来塩化物イオンとしては，海水飛沫や飛来塩化物が体表的な例ですが，最近では，冬期に寒冷地で散布される融雪剤や凍結防止材に含まれる塩化物イオンも外来塩化物イオンの代表的な例として取り上げられています。

### 4) 塩化物含有量に関する試験方法

フレッシュコンクリート中の塩化物含有量は，コンクリート中の水の塩化物イオン濃度と配合設計に用いた単位水量の積として求めます。フレッシュコンクリート中の塩化物イオン濃度は，JIS A 1144(フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験方法)に従って求めることが原則ですが，レディーミクストコンクリートの場合は，購入者の承認を得たうえで，JASS5 T-502(フレ

## 用語の解説

### 防せい剤

コンクリート中の鉄筋が使用材料に含まれる塩化物イオンによって腐食することを抑制するために用いる混和剤のことです。JIS A 6205(鉄筋コンクリート用防せい剤)に品質が規定されています。

### 照査

照査とは，設計・計画された内容が要求された性能を満足しているかどうかを実施工が始まる前の段階で判定する行為です。なお，検査とは，材料，製造・施工されたコンクリート，部材及び構造物が要求性能を満足し，受け取り可能かどうかを判定する行為です。

ッシュコンクリート中の塩化物量の簡易試験方法)等に従って、(財国土開発技術研究センターの技術評価を受けた「塩化物量測定器(試験紙法、イオン電極法、電極電流測定法など)」を用いて測定するのが一般的です。

一方、硬化コンクリート中の塩化物イオン量は、

JIS A 1154 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン試験方法)に従って測定されます。同方法は、コンクリートを粉末にし、酸で溶解して塩化物を抽出し、その溶液中の塩化物イオン濃度から総塩化物量を求める方法です。

(文責：材料グループ 真野孝次)

## 知っていましたか！コンクリートの耐久性のア・レ・コ・レ

### コンクリートクライシス

従来、コンクリート構造物は、維持管理や保全などのメンテナンスが不要な永久構造物とわれてきました。しかし、昭和50年代の後半、塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の早期劣化がマスコミ等で大きく取り上げられ、番組のタイトルであった「コンクリートクライシス(コンクリートの危機)」が大きな社会問題となりました。この問題を契機に、コンクリート中の塩化物総量の規制やアルカリ骨材反応に対する抑制対策が導入され、以降、新築されたコンクリート構造物においては、塩害やアルカリ骨材反応による早期劣化が著しく減少したといわれています。

その後、平成11年に「コンクリートが危ない」(小林一輔著、岩波書店)という書籍が出版され、それから約1か月後に、複数のトンネルや高架橋からのコンクリート塊の落下事故が相次ぎました。こういった一連の事故から再び「コンクリートクライシス」が社会問題となり、これを契機にコンクリート構造物の維持管理の重要性が改めて認識されるようになりました。

### 屋内と屋外の二酸化炭素濃度

環境条件は、屋内よりも屋外の方が厳しいのが一般的です。しかし、コンクリートの中性化に関しては、屋外よりも屋内の方が厳しい条件となります。屋外の二酸化炭素濃度は、概ね0.03~0.04%程度ですが、屋内の二酸化炭素濃度は、用途によって異なりますが、概ね0.1%程度であり、屋外の3倍程度の値です。日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針(案)・同解説では、大気中の二酸化炭素濃度の測定値がない場合は、屋外では0.05%、屋内では0.20%を標準とすることになっています。

なお、気象庁の観測結果によると、大気中の二酸化炭素濃度は、年に約1.8ppmの割合で上昇しており、この傾向は世界的に認められ、全世界の二酸化炭素平均濃度は、産業革命以前の濃度より3割程度増加したといわれています。

### 山間部でも塩害は生じます

海洋構造物や海岸近くのコンクリート構造物の塩害は広く知られていますが、山間部でも塩害は発生します。寒冷地では、冬期に道路や橋梁の凍結を防止するため、融雪剤や凍結防止剤が散布されます。これらの材料には塩化ナトリウムが含まれる場合が多く、外来塩化物イオンとしてコンクリートに侵入し、塩害が発生する場合があります。

また、寒冷地では、凍害と塩害による複合劣化が発生する場合も少なくありません。更に、塩素イオン(Cl)は、塩害の原因となりますが、ナトリウムイオン(Na)は次回紹介するアルカリシリカ反応を助長する場合があります。寒冷地では、凍害、塩害、アルカリシリカ反応による複合劣化も懸念されます。

### アルカリ性とアルカリ金属イオン

コンクリートの耐久性に関連する用語に「アルカリ」があります。今回紹介した中性化に関連する「アルカリ」は、酸性・アルカリ性の「アルカリ性」であり、主にOHなどのマイナスイオンが関係します。

一方、次回紹介する「アルカリシリカ反応」に関連する「アルカリ」は、アルカリ土類金属のことで、NaやKなどのプラスイオンが関係します。

両者は全く異なるものですが、マスコミ等で両者を混同して報道している例が見受けられます。読者の皆様も気を付けて下さい。