

第9回 鉄筋腐食

講師：肥田 研一

1. はじめに

コンクリート中にはセメントの水和反応に関与していない細孔溶液が存在しています。この細孔溶液は一般に pH12 以上の高いアルカリ性を示します。このような高アルカリ環境下の鋼材は、不働態化しており非常に腐食しにくい状態にあります。鋼材表面に酸素が化学吸着し、緻密な酸化物層が生じることによって厚さ 3 nm 程度の不働態皮膜が形成されるといわれています。この不働態皮膜がコンクリート中に配置された鋼材の防錆を担っています。

しかし、大気中の二酸化炭素等の浸透により鉄筋位置でのコンクリートが中性化されるか、塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透することなどにより、鋼材の防錆を担っていた不働態皮膜が破壊されると、鉄筋の腐食が始まります。

文献 1) では、コンクリートの経時的変化を劣化と位置づけ、鋼材腐食に着目し、劣化因子が浸透する「潜伏期」、鋼材の腐食が始まる「進展期」、鋼材等の腐食が加速される「加速期」、鋼材が断面欠損、破断する「劣化期」と分類しています。

したがって今回は、コンクリートの劣化である中性化または塩害により鉄筋に錆が生じる潜伏期から進展期における中性化と塩害の調査方法と、鉄筋の腐食が急激に進行する加速期以降の鉄筋腐食量の調査方法について解説します。

2. 中性化深さ

2.1 概要

コンクリート構造物の中性化とは、コンクリート中に浸透した二酸化炭素によって細孔溶液の pH が低下する現象です。

コンクリート中の細孔中に存在する水酸化カルシウムにより、フレッシュなコンクリートは、pH 12~13 を示します。このアルカリ気質により鉄筋に不働態被膜が形成され、鉄筋等の鋼材の防錆効果を維持することができます。コンクリート中に浸透した二酸化炭素により細孔中アルカリが中性化して鉄筋の不働態被膜が喪失し、鉄筋などの鋼材が発錆します。とくに、かぶり不足のコンクリート構造物によく見られます。

コンクリート構造物の中性化に伴う変化は、以下のようなメカニズムで進行します。

- ① 細孔中の空隙に二酸化炭素が侵入して、細孔中の溶液に溶解し、炭酸イオンとなる。
- ② 炭酸イオンと水酸化カルシウムが反応し、炭酸カルシウムが生成する。また、未水和セメントなども炭酸化する。
- ③ 炭酸化により細孔中の pH が低下する。
- ④ pH の低下に伴い不働態被膜が消失し、水分と酸素の供給により鋼材が発錆する。
- ⑤ 鋼材の発錆に伴いひび割れ、錆汁、浮き、剥離が発生する。

以上のように、コンクリート構造物の中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート中の空隙内に拡散することにより進行します。このため、中性化の進行は、コンクリート中における二酸化炭素の移動速度と細孔溶液の pH 保持能力に影響されます。

2.2 中性化深さの測定

一般に中性化深さは、フェノールフタレイン溶液を対象構造物に噴霧し調査を行うことが多いです（フェノールフタレイン法）。

フェノールフタレインは pH 指示薬の一種で、1%エタノール溶液（JIS K8001）に溶かし吹き付けて使用し、pH 8.2~10.0 程度のアルカリ側で紅色に発色することにより、中性化深さを測定します。

コンクリートは、pH 12~13 を示すため、pH が高いコンクリートはフェノールフタレインで発色しない場合がありますので、材料の新しいコンクリート等をフェノールフタレインで中性化深さ測定を行う場合は、この点を留意する必要があります。

2.2.1 はつり法

はつり法は、鉄筋を傷めないように電動ピックなどによりコンクリートをはつり、ハケやスポイト等できれいに清掃した後に、フェノールフタレイン 1% 溶液を一様に噴霧器等で散布し、無変色部の中性化深さを測定します。

はつり時のコンクリート微粉が周辺に残っていると中性化深さを正しく計測できないことがあるため、はつり後の鉄筋背面等の清掃は、掃除機、コンプレッサなどにより確実に行う必要があります。



写真-1 はつり法による中性化深さ

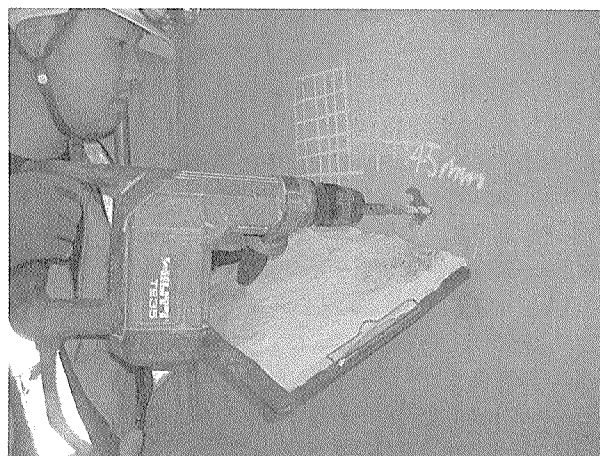


写真-3 ドリル法による中性化深さ

2.2.2 コア法

事前に鉄筋探査を行い、鉄筋を切断、傷めない位置でコアマシンにてコアを採取します。採取したコアを圧縮試験機で割裂させ、割裂面にフェノールフタレイン1%溶液を一樣に噴霧し中性化深さを測定します。

水酸化カルシウムは水溶性であるため、コアボーリングやダイヤモンドカッターのような冷却水を用いた切断方法による切断面での測定は、水酸化カルシウムが溶出したり、移動したりして着色の境界線が不正確になりがちです。このため、コア割裂面で測定を行うことが望ましいです。

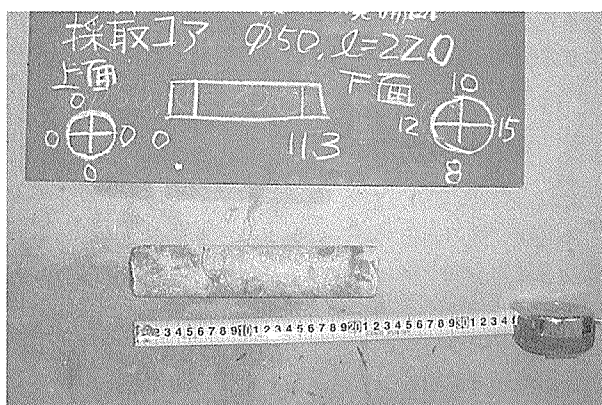


写真-2 コア法による中性化深さ

2.2.3 ドリル法

ドリル法は、電動ドリルの削孔粉を用いてコンクリートの中性化深さを測定する方法です。

試験紙にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し吸収させる。試験紙を削孔粉が落下する位置に保持し、コンクリート面に垂直に電動ドリルでゆっくり削孔します。落下した削孔粉が試験紙の一部分に集積しないように、試験紙をゆっくり回転させます。落下した削孔粉が試験紙に触れて紅色に変色したとき直ちに削孔を停止します。ドリルの刃を孔から抜き取り、ノギス等で孔の深さを測定します。

ドリル法は、他の方法に比べると精度は落ちますが、構造物に与える影響も少なく簡便であるために、多数の箇所の調査を行う場合には適した方法です。

3. 塩化物イオン含有量

3.1 概要

コンクリート構造物の塩害は、海水、凍結防止剤などに含まれた塩化物イオンがコンクリート中に浸透し、コンクリート中の鋼材が腐食する現象です。

コンクリート中にある塩化物は細孔溶液中でイオンとして存在する可溶性塩化物と、セメントの水和生成物として存在する固定塩化物に分けられます。フリーデル氏塩に代表される固定塩化物は強アルカリ性環境下で安定しており、鋼材は腐食せず塩害は発生しません。

しかし、外部からの可溶性塩分が塩化物イオンとしてコンクリート中に浸透し、その結果、鉄筋位置における塩化物イオンが一定量に達すると、鋼材の防錆を担っていた不働態皮膜が破壊され、鉄筋等の鋼材の腐食が始まります。すなわち、塩害を引き起こすのは可溶性塩化物の作用です。

鉄筋の腐食が始まる進展期に達すると、塩化物イオンにより破壊された不働態皮膜の防錆機能が喪失し、外部から供給される酸素、水分により鉄筋の腐食が進行し、腐食ひび割れが発生し、ひび割れ幅が拡大します。鉄筋腐食がさらに進むと、コンクリート片の剥落を生じるだけでなく、鋼材の断面欠損が進み、ついには構造物としての安全性が

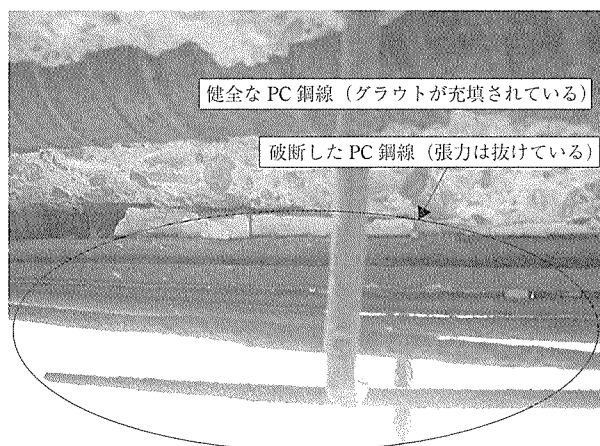


写真-4 塩害により PC 鋼材が破断した PC 構造物

喪失する事態となります。

塩害は、他の要因に比べて、急速に鋼材腐食の進行が進むため、PC 鋼材の破断など PC 構造物としての安全性が低下する重大な変状を生じやすいことがあります。

したがって、海岸や凍結防止剤散布地域などの塩害を受けやすい地域の PC 構造物では、点検を実施し塩害の変状の見落としがないよう注意するとともに、調査などにより塩化物イオンの浸透深さなどの情報を入手し構造物の維持管理を行う必要があると考えられます。

わが国では、塩化物イオンにより鋼材の発錆する可能性が高い限界値として、コンクリート中の塩化物イオン濃度として 1.2 kg/m^3 が採用されています²⁾。

3.2 塩化物イオン含有量試験

既設コンクリート構造物の塩分量を調べる方法としては、JCI-SC 4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」(JCI) に基づく電位差滴定法が多く行われています。

電位差滴定法は、硝酸銀溶液を用いた塩化物イオンの沈殿滴定法です。これは、反応の当量点近傍で被測定液の特性に大きな変化が生じるのを電極電位の測定から把握する方法です。

電位差滴定法による塩化物イオン浸透量は、以下の手順で行われています。

- ① コア採取：φ 60~100mm のコアを採取し、表面水をぬぐい去った後ビニール袋に密閉保存する。コアから試料を切り取る際は乾式のコンクリートカッターを用いて行う。
- ② 試料採取：切り取ったコンクリート片は、粗骨材を含めて全量を $149 \mu\text{m}$ 以下の粉末とし、分析用試料とする。分析用試料に硝酸溶液を加えて溶液の pH を 3 以下とし、加熱煮沸して全塩化物を溶解した後、不溶分を濾過洗浄する。
- ③ 測定：濾液を分取し、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定装置にセットし、硝酸銀標準溶液で電位差滴定する。「滴定量－電位変化」の滴定曲線から終点をもとめる。

電位差滴定法は、指示薬のように呈色の変化を見るのではなく、電気化学的な変化を捉えるので微量分析にも適用できます。また、コンクリートの圧縮試験用のコアを利用することもできるため圧縮強度試験用コアと兼用することもあります。

塩化物イオン含有量測定は、表面と鉄筋かぶり中間位置および鉄筋かぶり位置で通常行われます。しかし、内部塩分の疑いがあるような場合は、鉄筋位置より深い箇所での測定を行うとよいです。PC 構造物では、PC 鋼材の腐食が安全性に及ぼす影響が大きいため PC 鋼材位置での測定を行うとよいです。

塩化物イオン含有量測定をドリル粉末で行う場合は、表面から 2 cm ごとに最低 40 g の試料を採取します。

図 - 1 は、塩化物イオン含有量を測定した例です。表面から 50 mm 以下では塩化物イオン濃度が低くなっており 50 mm で高濃度塩分量となっています。これは、中性化に

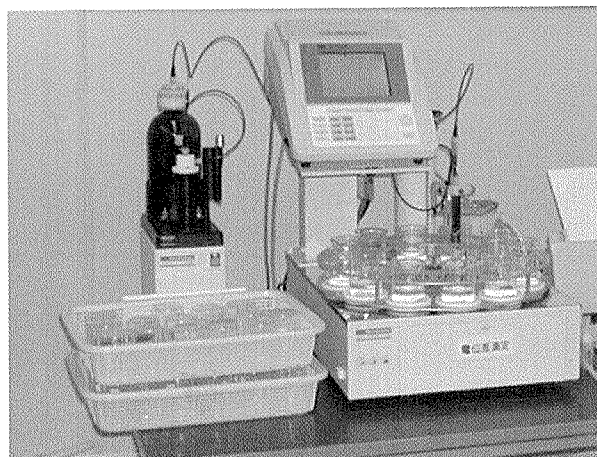


写真 - 5 電位差滴定装置

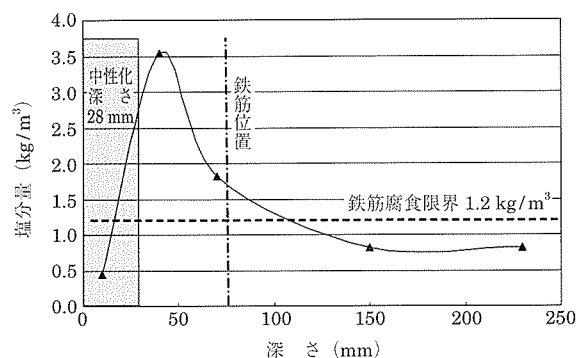


図 - 1 塩化物イオン浸透量測定結果例

より未炭酸化領域に塩化物イオンの移動・濃縮現象が生じているためです。

4. 鉄筋腐食量

4.1 鉄筋腐食量の測定

鉄筋腐食量の測定では、コンクリート構造物中から試験を行う鉄筋を取り出し「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」(JCI-SC1)³⁾ に基づき鉄筋の腐食面積率と腐食による減少重量を求めています。

鉄筋の腐食面積は、コンクリート構造物から取り出した鉄筋に対して、腐食状況を正確に写し取り展開図を作成し、腐食部分の面積をプランメーターや画像処理装置等により測定し、鉄筋の表面積で除して腐食面積率を求めます。

$$\text{腐食面積率} = \text{腐食鉄筋表面積} / \text{鉄筋表面積} \quad (1)$$

腐食による減少重量は、鉄筋の表面に付着したモルタルを除去後、鉄筋重量を測定し、次に上述した方法で錆を除去し、再度鉄筋の重量 (除錆後鉄筋重量) を測定します。これらの重量と腐食前の重量を用いて、式 (2) より鉄筋重量減少率を算出します。暴露試験等では、腐食前の鉄筋重量が既知ですが、構造物や鉄筋では腐食前の鉄筋重量は、通常、未知なので、同じ鉄筋の非腐食部の重量や計算上の重量を用いることになります。

鉄筋重量減少率 =

$$(腐食前鉄筋重量 - 除錆後鉄筋重量) / 腐食前鉄筋重量 \quad (2)$$

4.2 はつり出し

実構造物では、鉄筋を取り出して腐食量の測定を行うことができません。このため、鉄筋の腐食量は、部分破壊検査である、はつり出し法により腐食程度より鉄筋腐食量を調べています。

はつり出し法では、錆び汁が生じている箇所または鉄筋の腐食膨張による剥離・浮きが発生している箇所や比較的大きなひび割れが発生している箇所等の鉄筋腐食の可能性の高い箇所のコンクリートをはつり鉄筋の腐食状況を、目視で確認します。はつり出した鉄筋の径、種類を確認し、鉄筋に生じている錆の範囲、程度等の発生状況をスケッチおよび写真撮影で記録します。

鉄筋腐食の程度は表 - 1 の鉄筋腐食のグレード例を示します。

鉄筋の断面欠損がある場合には、ワイヤーブラシで錆を落とし、ノギス等により鉄筋径を計測します。

表 - 1 鉄筋腐食度判定例

グレード	鉄筋の状況
I	黒皮の状態、または錆は生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート面に錆が付着していることはない。
II	部分的な浮き錆があるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全長に渡って浮き錆が生じている。
IV	断面欠損を生じている。

写真 - 6 は、はつり出し法により腐食調査した事例です。この事例では、コンクリート表面の状況から腐食がもっとも進行しているとみられる箇所を選び、調査を行いました。その結果、表面錆が生じている程度であったため、表 - 1 のグレードⅢと判定されました。

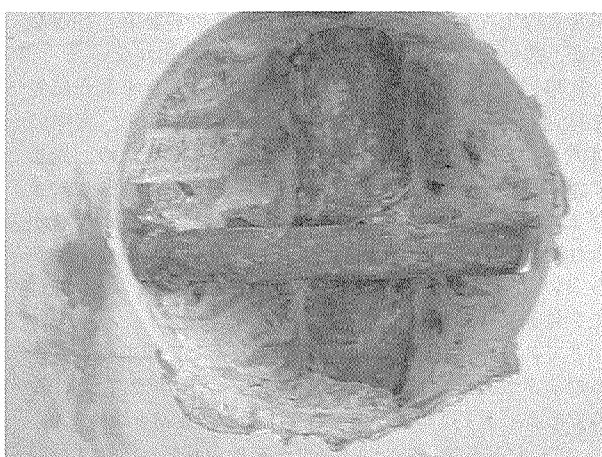


写真 - 6 はつり出し法による鉄筋腐食調査例

5. おわりに

PC 構造物には、鉄筋の内側に構造物の心臓部といえる PC 鋼材が配置されています。塩害などで腐食が急激に進行すると構造物の心臓部である PC 鋼材が破断され構造物の安全性が損なわれる重大な事態となります。

PC 構造物で鉄筋が腐食しているような状態であると PC 鋼材も腐食している可能性があります。とくに、グラウト未充てんの箇所があると、PC 鋼材の腐食が著しく、プレストレスの減少により、微細な曲げひび割れが発生していることがあります。このため、PC 構造物の鉄筋に腐食が発生している場合は、PC 鋼材の腐食の有無を確かめることが重要です。

PC 鋼材の腐食を確かめるには、レーダー法、電磁誘導法等により PC 鋼材位置を確認後、PC 鋼材をコア採取するか、はつり出し、ファイバースコープもしくは目視でグラウト状況とともに腐食状況を観察します。

また、鉄筋が腐食している箇所の周辺にコンクリートひずみ計を設置し載荷試験を行うと、ひび割れが発生している付近のひずみ計は、他のひずみ計に比べてきわめて低いか、きわめて高いひずみを示すことがあります。これは、微細ひび割れによりコンクリートひずみが伝達されないため、ひび割れ間のひずみ計は低い値を示し、ひび割れ上のひずみ計は高い値を示します。このような、コンクリートのひずみ挙動を示すときには、PC 鋼材の一部が破断して導入プレストレスが不足している可能性が高いです。

一般に、PC 構造物で鉄筋腐食の開始等の兆候が見られる段階（進展期、加速期前期）の対策として表面保護工などの対策を行います。この場合、PC 鋼材は健全であることが前提で、この段階（進展期、加速期前期）の対策は、比較的安価な対策となります。

しかし、PC 鋼材が腐食の開始もしくは一部の PC 鋼材の腐食、破断等が生じる段階（加速期後期、劣化期）では、対策として電気防食等の電気化学的対策とプレストレス導入工法等の補強対策を行うことになり、上記に比較して高価な対策となります。

したがって、PC 構造物では PC 鋼材に影響が及ぶ前の段階（進展期）で対策を行うことが重要です。このため、鉄筋等が腐食を開始する時期を予測するために、劣化因子の浸透量、浸透深さを定期点検等で調べ、これらのデータから鉄筋腐食開始の時期を予測して、鉄筋等が腐食する以前に対策を施すことが求められます。

今回は「鉄筋腐食（その2）」として、自然電位・分極抵抗・電気抵抗の計測による非破壊検査技術を解説いたします。ご期待下さい。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書[維持管理編]：(社)土木学会、
- 2) コンクリート標準示方書[施工編]：(社)土木学会
- 3) 「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案）：(社)日本コンクリート工学協会、1987

【2006年4月24日受付】