

第1回 劣化原因と検査技術

講師：渡辺 博志

はじめに

わが国に PC 技術が導入されて半世紀が過ぎました。これまで、常に優れた社会資本を構築するために新しい PC 技術の研究に努めてきた訳ですが、現在、多くの技術者の関心は、これまでに蓄積された構造物を良好な状態で、より長く機能させるという方向に向いていると思われまふ。このような情勢の中、当講座でも「補修・補強」について取り上げることと致しました。本テーマは様々な雑誌等でも既に取り上げられているものですので、ここでは、PC 構造を中心としたコンクリート構造物に可能な限りスポットを当てて、講座を展開して行こうと考えております。

今回の講座は、10 回シリーズを予定しており、「劣化原因と検査技術」、「補修材料」といった補修・補強の一般的概念から、PC 構造物の補修・補強事例等を、著名な講師の方に分かり易く解説してもらいます。どうぞ、ご期待下さい。(文責：講座部会)

1. まえがき

社会資本として膨大な量のコンクリート構造物のストックを抱えるわが国において、今後いかにこれらの構造物を適切に維持管理し、長寿命化をはかるかという課題は、とても重要なものであると考えられます。これまで、新規に建設されるコンクリート構造物に関して、その設計や施工に関する技術開発は積極的に行われてきました。PC 斜張橋、外ケーブル構造、高強度・高流動コンクリート等、これまでも実に多くの技術が実用化されています。今後は、新設の構造物に関する技術開発だけではなく、既設コンクリート構造物の維持管理、劣化対策に関する技術開発も非常に重要になるものと思われまふ。

コンクリート構造物の劣化メカニズムについては、いくつかのパターンが考えられ、そのうちの一つもしくは、複数の原因が複合して生じる場合もあります。構造物のおかれた環境条件、用いられた材料の種類とその配合条件、設計方法などに応じて劣化原因も異なってきます。

既設コンクリート構造物の健全度調査では、コンクリート構造物の劣化原因をおおよそ想定したうえで各種検査を実施し、その結果から劣化原因を特定するとともに、コンクリート構造物の劣化状況を把握します。この検査・診断というプロセスは、コンクリート構造物の維持管理計画の立案、補修の実施時期や補修によって改善しようとしている目標の設定や工法の選択などにおいて必要不可欠な重要なものです。

劣化原因とそれに対応したコンクリート構造物の調査方法は表-1¹⁾のとおりで、非常に多岐にわたります。これらのすべてをここで網羅的に述べるのは、とても筆者の力量

の及ぶところではありまふし、紙面の制約からも不可能であると思われまふ。

ここでは少し視点を変えて、具体例を通じて維持管理の合理化における検査・診断の重要性をあらためて確認することから始めたいと考えまふ。その後、コンクリート構造物においてもっとも重大な影響を及ぼす塩害による鋼材腐食に関わる劣化原因とそれに応じた検査技術などについて紹介することといたしまふ。塩害以外にも凍害、アルカリ骨材反応、化学的侵食などさまざまな劣化メカニズムが想定されますが、塩害がプレストレストコンクリート道路橋に関してもっとも一般的でかつ大きな影響を与えられまふためです。その他の劣化に関しては参考文献を参照していただければと考えまふ。

なお、コンクリート構造物の点検方法には、その点検の頻度・目的などに応じて日常点検や詳細点検などさまざまなものがあります。点検の際に用いられる検査手法も、当然点検の目的によって異なってきます。ここで紹介する検査手法は、どちらかというとも日常点検で用いる方法ではなく、コンクリート構造物の健全性を把握するために実施する詳細な点検を想定することとしまふ。

2. 調査診断の重要性

コンクリート構造物を新たに建造する際、ライフサイクルコストが次第に意識されるようになってきました。多少の初期コストの増加につながっても、構造物の長寿命化が達成できるのであれば、そのほうがトータルコストでは優れていると判断されます。

コンクリート構造物が建設された後についても同様です。たとえば、補修補強に関していえば、多少の初期コストの

表 - 1 劣化機構に基づく点検方法の選択基準

点検方法	原 理 試 験 項 目 等	劣 化 機 構					
		中性化	塩 害	凍 害	化学的浸食	アルカリ骨材反応	疲 勞
電気化学的方法	自然電位法	◎	◎	○	○	○	
	分極抵抗法	◎	◎	○	○	○	
応力測定法	載荷時のひずみ測定	○	○	○	○	○	◎
変形測定法	載荷時の変形測定	○	○	○	○	○	◎
目視, 写真撮影	双眼鏡, カメラ, 変形	◎	◎	◎	◎	◎	◎
打音法	打撃音, 波形解析	○	○	◎	◎	◎	○
反発硬度法	テストハンマー強度	○	○	◎	◎	◎	○
赤外線法	表面の赤外線映像	○	○	○	○	○	○
はつり試験	中性化深さ	◎	◎		○		
	鋼材腐食状況	◎	◎	○	○	○	○
採取したコアによる試験	鋼材引張強度	○	○	○	○	○	○
	中性化深さ	◎	◎		○		
	外観検査・ひび割れ深さ	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	錆等の目視	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	圧縮強度・引張強度・弾性係数			○	◎	◎	
	配合分析			○	○	○	
	塩化物イオン含有量	○	◎	○	○	○	
	アルカリ量分析					◎	
	骨材の反応性					◎	
	膨張量測定					◎	
	細孔径分布	○	○	◎	◎	○	
	気泡分布			◎			
	透気(水)性試験	○	○	○	○		
コンクリートの化学組成	熱分析(TG・DTA)	◎			◎		
	X線回折	○			◎	○	
	EPMA				○	○	
	走査型電子顕微鏡観察				○	○	
弾性波を利用する方法	超音波法, 衝撃弾性波法	○	○	◎	◎	◎	○
	AE法						○
電磁波を利用する方法(レーダー法)	鋼材配置	◎	◎	○	○	○	○
	空隙				○		○
	部材厚				○		○
電磁波を利用する方法(赤外線法)	表面はく離	○	○	○	○		○
電磁波を利用する方法(X線法)	鋼材位置・径, 空隙, ひび割れ	◎	◎	○	○	○	○
磁気を利用する方法	鋼材位置・径	◎	◎	○	○	○	○
電気を利用する方法	誘電率・含水率	○	○	○	○	○	
載荷試験(静的)	ひび割れ発生・剛性	○	○			○	○
載荷試験(振動)	固有振動数, 振動モード	○	○			○	○

凡例 ◎:劣化の程度にかかわらず重要なデータが得られる

増加につながるような補修補強材料・工法であっても、その後の維持管理の負担が軽減できるのであれば、その方が優れていると判断できます。

ここでは、PC橋のライフサイクルコストの例を参照しながら、維持管理における調査、検査、診断の役割について考えることから始めたいと思います。

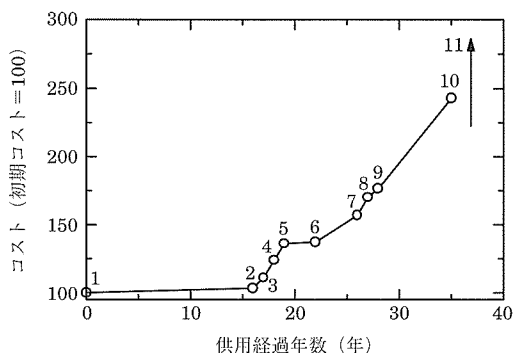
図-1は、ポストテンション方式のPC橋のメンテナンスに要した費用をあらわしたものです。このPC橋は、非常に苛酷な塩害環境におかれたもので、残念ながら建設後40年弱で撤去・新設が決まったものです。今日では、コンクリート構造物の塩害に関する研究が進み、これを防止するための設計や施工方法に関する知見が蓄積してきましたが、

当時としては、塩害による損傷が生じるのはしかたのないことであると思われます。

図-1を見ると分かるとおり、耐久性に優れるPC橋であっても、過酷な塩害環境の下では劣化を生じますし、一度劣化が顕在化した後は、かなり短いインターバルで、つぎつぎと補修を実施する必要が生じています。維持管理コストもこれに併せて上昇しています。

この例は、非常に苛酷な環境におかれた特殊な場合ですので、もちろん、すべてのコンクリート構造物がこのような経過をたどるというものではありません。ただし、ここで注目したいところとしては、

1) 塩害による劣化過程でいえば、いわゆる‘潜伏期’ある



注) 上図中の1~11は下表の項目に対応

項目	コスト類型	内 容
1	100	初期建設コスト
2	103	耐荷力調査+修復
3	111	修復+表面塗装
4	124	表面塗装
5	136	表面塗装+耐荷力調査
6	137	防水工
7	157	修復+中間支柱設置
8	170	外ケーブル補強他
9	176	修復+表面塗装
10	243	撤去
11		再建

図-1 塩害により劣化したPC橋の維持管理コストの例²⁾

いは‘進展期’にあたる建設完了からその後14~16年目あたりまでの間は、とくに大きな費用を要する調査や補修は発生していません。この間は、劣化は顕在化していないものの、部材内部では着実に劣化が進行していたものと考えられます。

- この間に、詳細な調査データが得られていたとすれば、比較的精度の高い劣化予測が可能であったのかもしれませんが。またその劣化予測結果に基づいて、もう少しゆとりのある適切な補修計画が立てられたのかもしれませんが。
- 近年、補修材料や補修方法が多様化しています。しかし、多様化した補修方法について、どれを選択するのが適切かを判断することは、必ずしも容易であるとは限りません。構造物の検査データは、その適切な選択に役立つものと期待されます。

といったことが考えられます。

補修補強を実施する際には、既設構造物に適切な検査を実施することにより、劣化原因の特定を行うとともに、構造物に進行している劣化の程度を把握することが非常に重要であるといえます。

ここでは、コンクリート構造物に生じる塩害による劣化と、それに対応した検査技術について、簡単に解説することとします。

3. 塩害による劣化

3.1 劣化機構の概要

コンクリート構造物の塩害は、あらかじめコンクリート中に含まれるか、もしくは、構造物完成後、海風や凍結防止剤などによって外部環境から供給される塩化物イオンに

よって引き起こされる劣化です。

コンクリート中の鋼材は、通常、セメントの水和によってもたらされる高いアルカリ性の雰囲気中で、その表面に不動態皮膜が形成されるため、腐食は生じません。しかし、何らかの理由で不動態皮膜が破壊されてしまうと、鋼材の腐食が始まります。腐食反応は、図-2に示すとおり、鉄がイオン化して溶け出すアノード反応と、電子が消費されるカソード反応から構成されます。腐食生成物は、元の鉄に比べて体積が大きいので、腐食反応の進行により、腐食を生じる鋼材周囲のコンクリートに膨張圧による引張応力が発生し、ひび割れが生じます。コンクリートにひび割れが生じることにより、鋼材近傍には水分や酸素などの供給が容易になり、カソード反応を促進し、腐食速度を著しく速める結果となります。ここで、酸素の供給が重要であることは次の例からも分かります。たとえば、完全に海中に没しているような鉄筋コンクリート構造物では、カソード反応を促進させるために必要となる酸素の供給が十分ではないため、コンクリート中に含まれる塩化物イオンとしては鋼材の腐食を発生させるのに十分な量であっても、腐食の進行速度としては必ずしも早くなるとは限りません。むしろ、十分な酸素の供給がある飛沫帯などにおかれる構造物の方が腐食速度は速いのはそのためであると考えられます。図-3は土木学会コンクリート標準示方書に示された塩害の劣化進行過程です。塩害はひび割れの発生を伴って劣化が顕在化する、すなわち加速期に入ると、その後の進行は非常に急速に進むため、慎重な対応が必要になります。

ここで、図-1と図-3を比較すると、ある時期を境として傾きが急になるという、非常によく似た特徴を有することが分かるかと思えます。このように、維持管理コストが

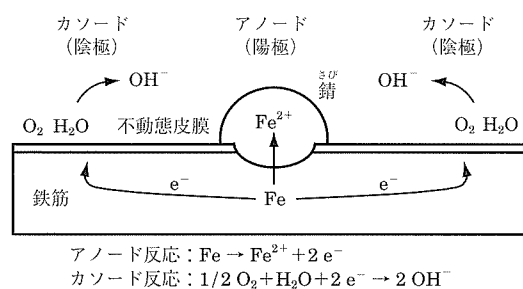


図-2 腐食反応の模式図³⁾

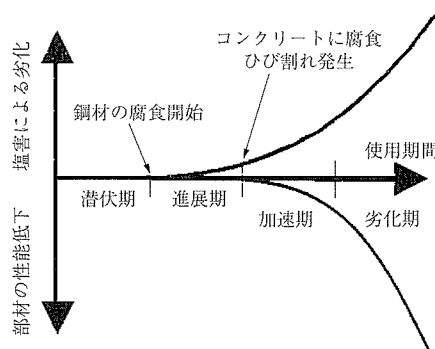


図-3 塩害の劣化プロセス¹⁾

急増したことは、塩害という劣化のメカニズムの特性を反映したものであると考えられます。

3.2 劣化のプロセスと対処方法

表 - 2¹⁾ は、劣化状況に対して有効なコンクリート構造物の補修方法を表したものです。劣化の進行状況に応じて適切な対応方法は大きく異なっていることが分かります。すなわち、劣化の程度が潜伏期の状態では、鋼材位置におけるコンクリート中の塩化物イオン量が劣化の程度を左右するもっとも重要な指標であると考えられます。構造物の検査手法としては、コンクリート中の塩化物イオン量や鋼材腐食の可能性の評価に重点がおかれるものとなります。対処方法としては、コンクリート中への塩分の浸透を抑制する手法が主になります。

表 - 2 構造物の外観上のグレードと標準的な工法¹⁾

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
I - 1 (潜伏期)	(表面処理)*
I - 2 (進展期)	表面処理, 電気防食, 電気化学的脱塩
II - 1 (加速期前期)	表面処理, 断面修復, 電気防食, 電気化学的脱塩
II - 2 (加速期後期)	断面修復
III (劣化期)	FRP 接着, 断面修復, 外ケーブル, 巻立て, 増厚

※：予防的に実施される工法

構造物の劣化の進行が進展期あるいは加速期前期にさしかかってくると、①大量の塩化物イオン量を含むコンクリートを取り除き、その部分を補修材料で修復する、②電気的にコンクリート中に存在する塩化物イオンを取り除く、あるいは③コンクリート中の鋼材の腐食反応が進行しないよう電気防食を施すといった対処方法が必要になります。

進展期ではすでにコンクリート中の鋼材が腐食を開始するのに十分な量の塩化物イオンが存在している状況です。一般的には、鋼材が腐食を生じる限界の塩化物イオン量は、全塩分として 1.2 kg/m³ とされています。しかし、中性化の進行により、コンクリートの pH が低下してきているような場合には、必ずしもこのとおりの値になるとは限りません。

この時期の調査としては、コンクリート中の塩化物イオン量の分析・中性化深さの測定や後述する電気化学的検査手法を用いてコンクリート中の鋼材の腐食環境が形成されてしまっているのかを確認することになります。また、補強など耐荷性能に関する対応が必要かどうかを明らかにするための調査も重要になってきます。

このように、劣化の進行プロセスによって対処方法が異なるとともに、主となる調査項目も異なってくることに注意が必要です。

4. 調査・点検手法

4.1 調査内容

塩害を生じたあるいは生じることが予想されるコンクリート構造物の調査内容としては、まず、損傷が外観から認識できる程度に進行しているか、鋼材の腐食が進行している可能性があるかどうか、コンクリート中の塩分量がどの程度かを調べるのが重要になります。このために、構造

物の外観などを調査するとともに、構造物の建設時の使用材料や設計図書などの資料調査、コンクリート中の塩化物イオン量、自然電位や分極抵抗、電気抵抗といったコンクリート中の鋼材の腐食に関する電気化学的な情報を試験検査により求めておく必要があります。また、コンクリート中の鋼材の位置・かぶりを明らかにするための鉄筋探査が必要になる場合もあります。

また、かぶりコンクリートのはく離が心配されるような状況も考えられます。その場合には、かぶりコンクリートのはく離に関する非破壊検査が必要になります。

4.2 資料調査

資料調査におけるポイントとしては、構造物の設計図書や補修履歴などの資料を確認しておく必要があります。構造物の建造された年度によって、適用されている基準類が、現在の内容と異なっている可能性があるため資料による確認は重要です。とくに、かぶりや最小鋼材量といった構造細目に関した項目、使用材料が準拠する JIS などの規格類には注意する必要があります。また、コンクリート中の初期塩化物イオン量の基準値の変遷やアルカリ骨材反応対策、施工方法の変遷なども参考になります。

次に、環境条件に関する調査も必要になります。塩化物イオンが海洋環境から供給される場合は、コンクリート構造物の建設されている位置から海岸線までの距離に応じて、飛来する塩分量は異なってきます。ただし、海岸線からの距離のみで決まるわけではなく、日本海側や瀬戸内海側といったように、地域による差も非常に大きく影響します。このため、過去において、構造物のおかれている地域もしくはその近傍において、飛来塩分量を測定したデータがないかどうか、調べておくことが重要です。場所によっては飛来塩分量が年間を通じて大幅に変化する可能性があります。図 - 4 は飛来塩分量の測定値の月別変動を測定した結果を示したものです。

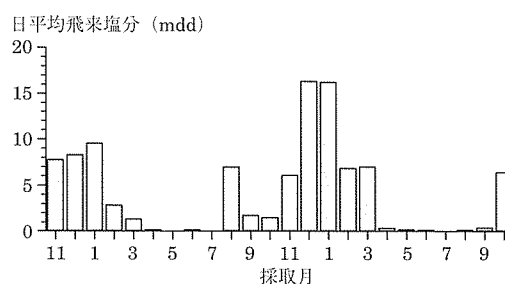


図 - 4 月別日平均飛来塩分量⁴⁾

また、これ以外に十分気をつけたいことは、構造物のおかれる局所的な位置関係によって、塩分の飛来する量が大きく変化する場合があることです。海風のあたり方、海風の滞留状況といった、非常に局所的な条件によって飛来塩分量が影響を受けることになります。

図 - 5 は塩害環境下にコンクリート供試体を暴露し、コンクリート表面からの塩化物イオンの分布の測定結果を示したものです。供試体前面は海に面していて、海風が直接あたるようになっています。一方、供試体の背面には機材

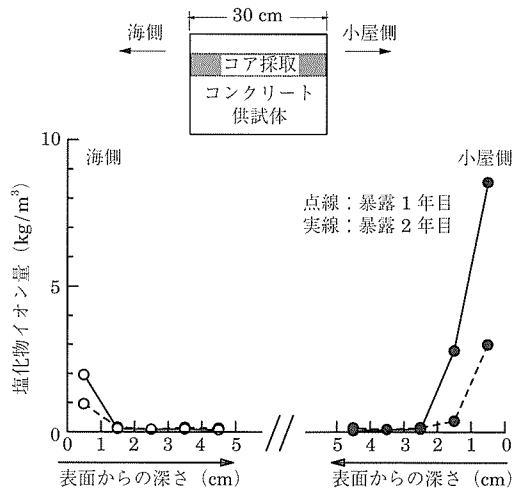


図-5 暴露供試体の塩分分布測定結果の例⁴⁾

保管用の小屋が1 m程度の距離で存在しています。一般的には、海側に向けた面の方が直接海風にさらされますので、より多くの塩分がコンクリート中に浸透すると予想されます。しかし、測定結果によると直接海風のあたらない背面側のほうが、塩分量はむしろ多くなっています。コンクリート構造物のおかれる環境条件の調査として、飛来塩分量を大まかに捉えることは非常に重要ですが、それと同時に、局所的な条件によっても、飛来塩分量に大きな違いが生じることもふまえておくことが重要であるといえます。

4.3 コンクリート中の塩分量の分析

コンクリート構造物の塩分量の調査を行うことにより、かぶり位置での塩分量から鋼材の腐食の可能性を評価するとともに、塩分量の深さ方向の分布状況を求めることにより、将来にわたっての塩分量の浸透予測を行うことも可能となります。コンクリート中の塩分の分析手法は、構造物から採取したコンクリートを微粉砕し、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に従って行います。

コンクリート中の塩分量の分布を測定し、その結果から塩分の浸透予測をする具体的な方法については、文献⁵⁾等に示されています。コンクリート中の塩分浸透が拡散現象であるとし、Fickの拡散方程式の解に、塩化物イオン濃度の分布の測定結果をあてはめることにより、コンクリート表面での塩分濃度および見かけの塩分拡散係数を定めることとなります。

ここで、コンクリートにあらかじめ初期塩化物イオンが含まれている場合は、これを拡散によってコンクリート中に浸入した塩分と区別して考える必要があります。通常は、コンクリートの表層からかなり内部に位置する部分で採取されたコンクリートサンプルに含まれる塩分を初期塩分として考慮するのが一般的であると考えられます。言い換えると、コンクリート中に存在する塩化物イオンが外部環境から供給されたものなのか、あるいは海砂の使用などによって初期から含まれていたものかを明らかにするため、一箇所はかなり深い位置での塩化物イオン測定用のサンプルを採取しておいた方がよいと思われます。

コンクリート中の塩分分布を測定した際、得られる塩分分布状況は、拡散方程式で想定されるとおりの分布状況を示す場合ばかりであるとは限りません。場合によっては、表層から数センチ深い所にピークを有しているなど、深さ方向に単調に塩分濃度が減少していない場合もあります。図-6は海岸近くに建設された鉄筋コンクリート橋脚のコンクリート中の塩化物イオン量の分布を示したものです。P-2梁での測定結果は単純な拡散理論に従って予測される塩化物イオン分布に近い状況にありますが、それ以外の位置で測定した塩化物イオン分布は表層付近で塩化物イオン量の減少が認められ、単純な拡散理論では説明できないものとなっています。

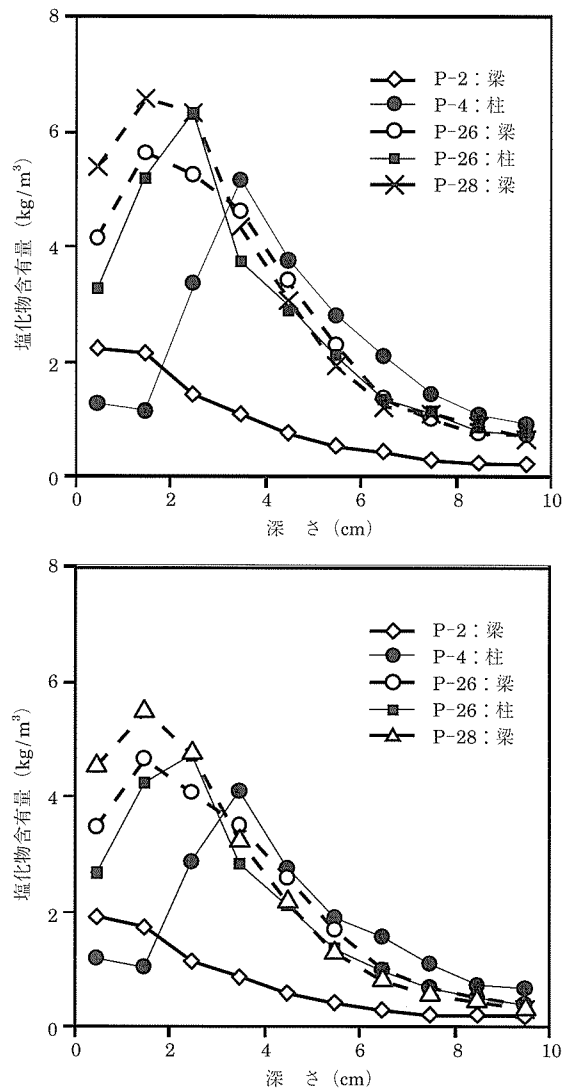


図-6 塩化物イオン測定結果の例⁶⁾
(上：全塩化物，下：可溶性塩化物)

なぜ、このような塩分分布になるのかについては、たとえば、コンクリートの中性化による影響、あるいは乾湿の繰り返しによるコンクリート中の水分の移動の影響、凍結融解作用による影響など、いくつかの原因が想定されます。この点に関しては、今後の検討課題であると考えられます。

4.4 電気化学的検査手法

(1) 自然電位法

電気化学的な検査手法としては、自然電位法、分極抵抗法、コンクリートの電気抵抗の測定が知られています。このうちもっとも一般的に用いられているのは、自然電位法です。図-7に自然電位の測定方法⁷⁾を示します。自然電位法は非破壊検査手法の一つですが、厳密にいうと完全には非破壊ではなく、電位差計の+極と鋼材を電気的に接続するためのドリル孔を必要とします。

自然電位法がよく用いられる理由としては、測定が比較的容易であること、鉄筋の腐食に直結した情報が得られること等が上げられます。近年は、照合電極として回転式電極を用いて測定効率の向上を図った装置も市販されるようになりました。

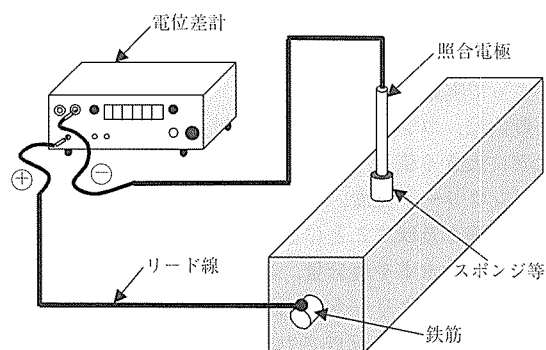


図-7 自然電位法

自然電位法は、コンクリート中の鋼材の腐食の可能性を評価することを目的としています。これは、コンクリート中の鋼材の不動態皮膜が破壊され、腐食を生じる可能性が高い場合は、自然電位の測定値に反映されることを利用するものです。たとえば、ASTMによると、飽和硫酸銅電極換算で -350 mV よりも卑な電位が測定された場合は、その鋼材の腐食は90%以上の確率で生じていると判断されます。一方、飽和硫酸銅電極換算で -200 mV よりも貴な電位が測定された場合には、その鋼材の腐食は90%以上の確率で発生していないと判断されます。

自然電位法が適用不可能な構造物としては、常時海水中にある構造物や、コンクリート表面あるいは鋼材表面に塗装などの被覆を施した場合があげられます。

図-7中に示した電位を測定する際に用いる電位差計は、できる限り内部抵抗の大きなものが望ましく、通常 $100\text{ M}\Omega$ 以上の抵抗を有するものが用いられます。

用いる照合電極には、さまざまな種類がありますが、飽和硫酸銅電極(CSE)、塩化銀電極、鉛電極、酸化水銀電極などが一般的です。測定した電位は、照合電極の種類に応じて異なるので、相互比較するためには換算が必要となります。通常は、飽和硫酸銅電極換算で結果を記録することとなっています。

自然電位の測定結果は、測定を行った箇所腐食傾向を捉えるために、累加頻度図もしくは等電位線図などによって整理されます。一般的に、等電位線図において電位が卑

となっている箇所が腐食を生じているアノードの可能性が高いと考えられます。

自然電位の測定にあたって、とくに気をつけたいところは、

- 1) 用いる照合電極の整備が十分に行き届いているかどうか。
 - 2) 測定対象のコンクリート表面の湿潤条件が適切であるか。
 - 3) 測定対象となる鉄筋と、照合電極と電気的接続を行った鉄筋と間に、電気的導通があるかどうか。
- 等があげられます。

照合電極の整備についていえば、飽和溶液を用いている場合は、その溶液量が十分かつ飽和条件が満たされているか、電極として用いられている金属によごれなどが生じていないか、といった点に注意が必要です。

自然電位を測定する場合は、コンクリートの測定面は十分に湿潤状態に保つことが必要となります。一般的には30分程度の湿潤時間の確保が必要です。湿潤後、あまり長時間をおきすぎると、コンクリート表面が乾燥するので、再び湿潤状態にする必要が生じます。図-8は散水後の経過時間とともに自然電位の測定値がどの程度変化したかを示したものです⁸⁾。コンクリート測定面の風のあたり方、気温などによっては結果が異なる場合がありますが、少なくとも測定面の湿潤条件の違いによって、自然電位の測定値にこの程度の差が生じうることは十分注意しておく必要があると考えられます。

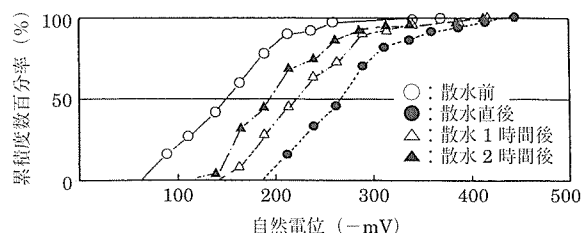


図-8 散水後の経過時間の影響⁸⁾

次に、鋼材の導通についてですが、照合電極と電気的接続を行った鋼材と間に、電気的導通がなければ、その鋼材の電位は測定結果に反映されません。通常は、結束線などによって鋼材間には導通のある場合が多いですが、導通の取れていないケースもないとは限りません。このため、測定位置から照合電極と鉄筋の結束を行った位置まで距離が長い場合は、かぶりコンクリートの一部をはつり、鉄筋表面を露出させ、導通の確認を取ったほうが確実であると思われます。

自然電位法は、測定が比較的簡易ではありますが、いくつかの問題点も有しています。たとえば、ASTMに示された判定方法では、測定された自然電位の測定結果が、飽和硫酸銅電極換算で -200 mV から -350 mV の間にある場合は、鋼材の腐食確率は不確定と判断され、明確な情報が得られないこととなります。また、自然電位の測定によってえられる情報は腐食の可能性のみであり、腐食速度に関す

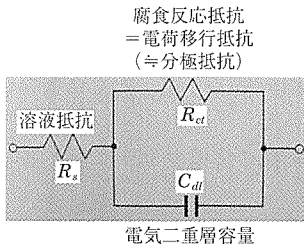


図 - 9 電気的等価回路モデル

る情報は得ることができません。

自然電位法を用いて鋼材腐食の判定精度を向上させるための改善方法としては、たとえばかぶりコンクリートの品質を考慮する方法、あるいは、以下に述べる分極抵抗法を合わせて用いるなどの手法が試みられています。

(2) 分極抵抗法

自然電位法は、測定した時点での鋼材の腐食確率を判断するものであり、測定以後の腐食の進行予測をする目的のものではありません。一方、分極抵抗法は、自然電位とは異なり鋼材の腐食速度を推定するための測定方法です。腐食速度を推定することができれば、腐食進行の予測が可能になりますし、ある腐食量に達するまでの時間の推定も可能になります。

分極抵抗の測定原理⁹⁾を簡単に述べると次のとおりです。コンクリート中の鋼材の自然電位を外部電源によって ΔE だけ変化させることにより、外部電源から鋼材に電流 ΔI が流れます。ここで、外部電源からの影響により、電流が流れた部分の面積を a とし、電流 ΔI はこの面積 a で除した単位面積あたりの電流、すなわち電流密度 (単位は A/cm^2) とします。

ここで、電位の変化 ΔE が非常に微小な場合では、 ΔE と ΔI の間には次式に示す比例関係が成立します。

$$\Delta E = R_p \cdot \Delta I$$

上式において R_p が分極抵抗とよばれるもので、 R_p は腐食速度と反比例の関係にあることが確認されています。すなわち、腐食電流密度を I_{corr} とすると、比例常数 K を用いて I_{corr} は次式で表されます。

$$I_{corr} = K/R_p$$

すなわち、 R_p の値が大きいほど腐食電流密度が小さい (腐食速度が遅くなる) と判断され、 R_p の値が小さくなると腐食速度が速くなり、劣化の進行も速くなると考えられます。

ここで、分極抵抗 R_p を求めるためには、外部から電流を加え、この電流によって変動する鉄筋の電位を測定する必要があります。用いる電流としては、直流あるいは交流がありますが、一般には、交流 (交流インピーダンス法) が用いられることが多くなります。これは、周波数が大きく異なる交流すなわち、高周波の交流電流を与えた場合と、低周波の交流電流を与えた場合とで、そのインピーダンスの差を測定するものです。

このように、分極抵抗法は自然電位法では得られない情報、とくに腐食の進行予測をする際に必要となる腐食速度が得られる点は非常に魅力的です。ただし、実際の現場へ

の適用を図る場合には、自然電位の測定に比べて、一点あたりの測定に要する時間が長くなるので、測定計画を立てる際はその点をふまえておく必要があります。

分極抵抗法は、まだ歴史が浅く、自然電位法のように標準的な測定方法や測定装置を定めた基準も確立していない状況です。今後は、数多くの実績を蓄積し、比例定数 K の値を確実にするとともに、標準的な試験方法を確立する必要があると考えられます。とくに、交流インピーダンス法で分極抵抗を求める場合は、周波数の選択、分極する範囲の広がりなどをどのようにとらえるか等を明確にすることが重要であると考えられます。

(3) コンクリートの電気抵抗

コンクリートの電気抵抗はコンクリート中のイオンの動きやすさを表わすものであり、抵抗が小さくなるほどイオンが移動しやすい、すなわち、腐食速度が大きくなりやすいことを表すものと考えられます。

コンクリートの電気抵抗の測定は、通常、Wenner の四極法によって実施されます。

一般的に、コンクリートの電気抵抗はコンクリート中の含水率に大きく依存することになります。また、このほかに、コンクリート温度、測定地点と鋼材の位置関係も電気抵抗に影響を及ぼすことになります。したがって、コンクリート中の含水率や塩分量、コンクリート温度などの情報が総合的にコンクリートの比抵抗についてはコンクリート中の鋼材の腐食環境に反映されると考えられます。しかし、測定上の問題ではあるが、比抵抗測定位置と鋼材間の距離の影響は比較的大きいため、腐食環境の評価とは切り離しておかなければなりません。図 - 10¹⁰⁾ は鉄筋がかぶり 3 cm の位置に配置されている場合に、鉄筋の直上および 5 cm 水平方向に離れた位置 (図中では供試体中央としている) で四極法を用いてコンクリートの比抵抗を測定した結果を示しています。この結果によると、電極の配置間隔および電極の配置位置によって比抵抗の値が変わっていることが分かります。鉄筋を配置しない場合の比抵抗の値はおおむね $4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ と測定されましたので、これより小さい場合では、鉄筋の影響を受けてコンクリートの比抵抗の値が見かけ上、小さくなっているといえます。電極の配置間隔を小

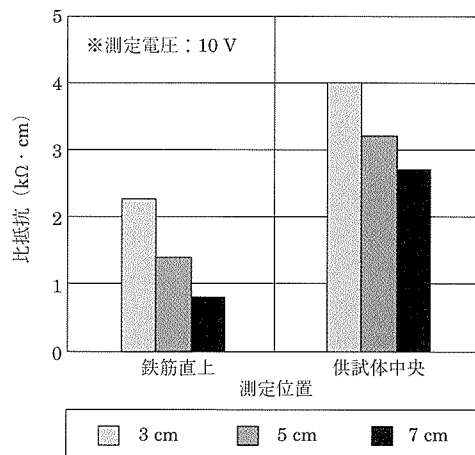


図 - 10 鉄筋位置が比抵抗測定結果に及ぼす影響

さくした方が鉄筋の影響は受けにくくなるものの、粗骨材最大寸法との関係から、測定値のばらつきが大きくなりやすくなる¹¹⁾ 点に注意が必要です。

4.5 その他検査方法

上記は主に塩害による鉄筋腐食を対象として、電気化学的な検査方法を示しました。これ以外にも、たとえばコンクリート強度の推定評価のための試験としてテストハンマー試験、コンクリートのはく離を検出するための超音波、打音による検査、赤外線画像による評価、などが行われる場合がありますと考えられます。

また、これ以外にも、プレストレストコンクリート構造物特有のものとして、たとえばシース内のグラウトの充填状況の検査法などがあげられます。

以上を含め主な参考文献 12)～14)を示します。

5. あとがき

現在、筆者は英国の道路庁 (Highways Agency) 訪問の機会を与えられ、コンクリート道路橋の劣化状況や維持管理の手法に関する英国での実態調査を行っております。英国におけるコンクリート道路橋の劣化パターンとしてもっとも一般的なのは、凍結防止剤の散布による塩害です。劣化状況に応じて、さまざまな検査手法が提案されていますが、基本的にはここで触れた手法と類似のもので、状況は日本と似ております。英国においてコンクリート橋を専門に扱う協会 (Concrete Bridge Development Group, CBDG) から、2002年にコンクリート構造物の耐久性を試験モニタリングするためのテクニカルガイドブック¹⁵⁾ が発刊されていて、非破壊検査技術に対する関心の高さをうかがい知ることができます。

ただし、非破壊検査を使いこなすためには、ある程度の経験が要求されますし、効率的な測定を行うには事前に適切な検査計画をたてておく必要があります。今後は、検査手法の一層の省力化、検査の適用実績の積み重ねとデータベース化、各種検査手法の測定・判定の精度をふまえた有効な活用方法、等が課題であると考えられます。

参考文献

- 1) 2001年制定, 土木学会コンクリート標準示方書, 維持管理編, 2001年
- 2) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—, 土木研究所資料第3811号, 2001年3月
- 3) コンクリート診断技術 '02, 日本コンクリート工学協会
- 4) 現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工方法の開発に関する共同研究報告書, 共同研究報告書第266号, 国土交通省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2001年3月
- 5) 2001年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編] 制定資料, コンクリートライブラリー104号, 土木学会, 2001年
- 6) コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書, 共同研究報告書第195号, 建設省土木研究所・日本構造物診断技術協会, 1998年3月
- 7) (社)土木学会:鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)—コンクリート委員会腐食防食小委員会(2期目)報告一, コンクリート技術シリーズNo.40, 2000.12
- 8) 足立幸郎, 宮川豊章, 関 惟忠, 小林茂広:自然電位・分極抵抗法による鉄筋腐食現地追跡調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1243-1248, 1995
- 9) (社)土木学会:鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向—コンクリート委員会腐食防食小委員会報告一, コンクリート技術シリーズNo.26, 1997.12
- 10) 古賀裕久, 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹:コンクリートの電気抵抗による耐久性評価に関する基礎的研究, 鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷シンポジウム講演論文集, pp. 89-94, 2001年1月
- 11) Gowers, K.R. and Millard: Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, ACI Material Journal, pp.536-541, 1999, Sept-Oct.
- 12) (社)日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, 2001.3
- 13) 魚本健人, 加藤 潔, 広野 進:コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ5 コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.5
- 14) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三:コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3 鉄筋腐食の診断, 森北出版, 1993.5
- 15) CBDG: Guide to testing and monitoring the durability of concrete structures, Technical guide2, 133pp. 2002., www.cbdg.org.uk

【2003年4月1日受付】