

# PCに関する試験および測定 入門講座

No.10

## PC構造物の非破壊試験および健全度判定法

講師：日本構造物診断技術協会委員会\*

### 1. はじめに

「コンクリートはアルカリ性（pH13程度）であるため、コンクリート中の鋼材は腐食せず、コンクリート構造物はメンテナンスフリーである。」と古い教科書には書かれていました。実際、設計・材料選定および施工が適切に行われていれば、50年程度の使用期間内では軽微な補修で十分です。しかしながら、海岸付近のように著しい腐食環境下に建設された構造物は、材料、設計、施工が適切でない場合には、供用開始後数年で劣化し始め、補修を行わなければ構造物としての機能が維持できなくなることがあるのもまた事実です。

このような早期劣化については研究が進み、新設構造物の耐久性向上に関する限り、塩化物総量規制あるいはアルカリ骨材反応対策等を講じることで対処可能となってきました。しかし、これらの手法は、いずれも新設される構造物に対する技術ですから、すでに建設されている構造物へはそのまま適用できません。そのため、既存の構造物の機能を合理的に維持・管理する技術の確立が急がれています。

このような既設構造物の維持管理として以下の方法などが考えられます。

- ① 高性能な補修材料・工法によって劣化構造物を大改修して性能を大幅に改善する方法
- ② 構造物の損傷が目立った時に補修を頻繁に行う方法
- ③ 構造物の状態をモニタリングして劣化があまり進行しない時点で早めの補修を行う、いわゆる予防保全方式

このうちどの方法を採用するかは構造物の置かれている状況によって異なるので、一概に決めることはできません。この中で、③の方法は、ちょうど人間の健康管理のための人間ドックのようなもので、構造物を常に良好な状態に保つことができる理想的な方法と言えます。言うまでもなく、この方法が十分に機能するためには、適正な検査と判断が行われることが前提となります。

ところで非破壊試験は、構造物にほとんど損傷を与え

ることなく、くり返し測定が可能で客観的に劣化の状況を判断し原因を推定しうる検査方法と考えることができます。そして、近年この手法の研究が進み、信頼性も向上し実務へ応用する下地も整いつつあります。以下、非破壊試験の現状について概説いたします。

### 2. 構造物の劣化と補修後の構造物の状況

#### 2.1 構造物の劣化原因

コンクリート構造物の劣化は種々の原因によって起こりますが、実際の構造物が劣化する原因としては何が関与しているのでしょうか。ここでは、昭和60年代に建設省管内で実施されたアンケートによるコンクリート構造物の補修実態調査結果<sup>2)</sup>をもとに、劣化原因を調べてみます。図-1は、構造物の劣化原因をまとめたものです。劣化原因については要因が複合している場合もあることから、この図では複数の回答も有効として処理しています。

コンクリート構造物の劣化原因としては、塩害が圧倒的に多く、凍害とアルカリ骨材反応がこれに続いています。中には、施工誤差（具体的にはかぶり不足）も含まれています。調査は、図-2に示しますようにPC、RCを問わずに行われました。

したがって、PC構造物においても、塩害に対する予

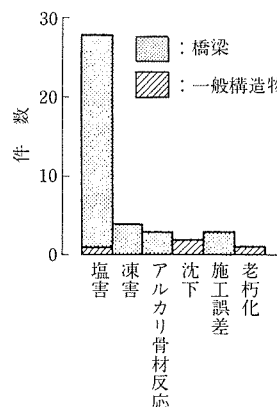


図-1 コンクリート構造物の劣化原因

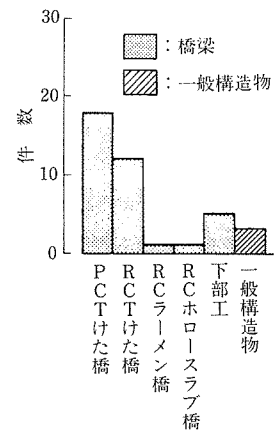


図-2 調査対象となったコンクリート構造物の種類

\* 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部会

防・保全対策を立てることが極めて大切であることがわかります。

### 2.2 構造物の補修後の状況

調査対象となった構造物の補修前の健全度を整理する

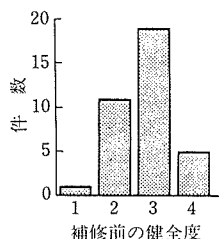


図-3 調査対象となったコンクリート構造物の補修実施直前の健全度

と図-3のごとくなります。ここでは、健全度を表-1<sup>3)</sup>のように定義しています。コンクリート構造物の補修は、多くの場合健全度2と3つまり構造物に鋼材の腐食が生じている兆候が明らかになった時点で行われていることがわかります。

表-1 構造物の健全度判別基準

| 健全度 | 構造物の状況  |
|-----|---|
| 1   | 鋼材の腐食の進行により、部分的あるいは連続的な鋼材の露出または破断が認められたり、コンクリートの断面欠損が著しく認められる場合 |
| 2   | 鋼材の腐食の進行により、連続的なコンクリートのひび割れ、錆汁および剥離、剥落が認められる場合                  |
| 3   | ひび割れ、錆汁あるいはコンクリートの剥離が認められるが、その範囲や程度が小さい場合                       |
| 4   | ごく軽微なひび割れ、錆汁が認められる場合  |
| 5   | 損傷が認められない場合   |

次に補修された構造物はその後どうなるのでしょうか。この調査では塩害による劣化が大半を占めたため、対象となる構造物の環境は海岸線からの距離によって大きく左右されています。そこで、補修後の構造物の状況を追跡調査するにあたって、塩害が過酷な海岸線から100m以内の環境下にある場合と100m以上の環境下に分類してみました。その結果は図-4のようになり、補修後再び劣化が生じるのは海岸線からの距離が100m以内の過酷な環境にさらされるものが多くなっています。

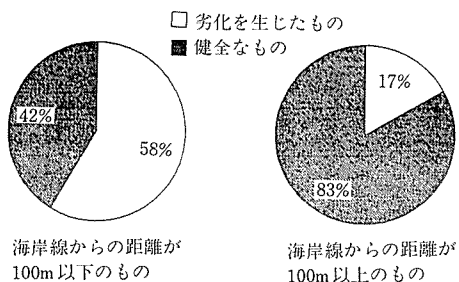


図-4 構造物建設地点の海岸からの距離別の補修後構造物状況

一方、図-5は補修が行われる前の健全度とその後の再劣化の状況を示しています。海岸線から100m以内では健全度3まで放置するとその大半が再劣化しています。

この現状を見ると、単に補修をすればよいということではなく、その補修時期が補修の効果を発揮させるために大切であることが理解されます。

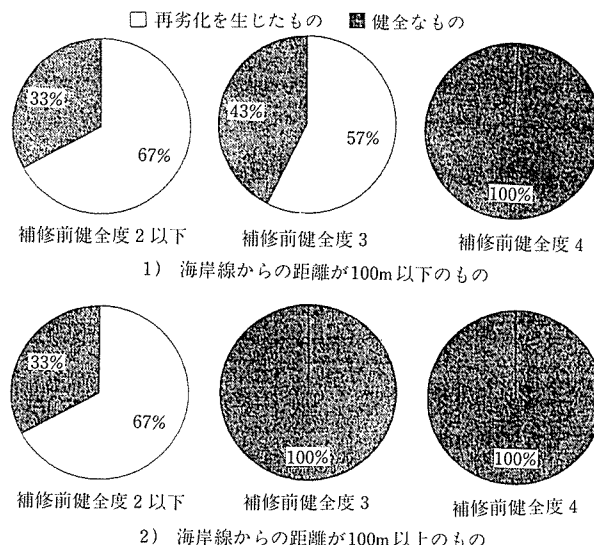


図-5 補修前の構造物の健全度と補修後の構造物の劣化の有無について

### 2.3 非破壊試験の必要性

前述の調査結果によれば、塩害の過酷な環境下では、構造物の健全度が4と劣化が極めて軽微な段階で補修を行わない限り、補修をしてもその効果は完全ではなく、再補修の必要性に迫られる危険性が非常に大きくなっています。

補修工事の労力・コストを低減して合理的な維持管理を実現していくためには、構造物の劣化による損傷が軽微なうちに補修を実施すること、とりわけ塩害環境の厳しいところでは、早期に損傷を発見し適切な対策を講じることが必要となります。換言すれば、目視で損傷が認められた時点ですでに手遅れと考えられます。非破壊試験は、このような調査で威力を発揮すべき検査方法で、その目的から言えば、構造物の劣化が顕在化する以前の軽微な変状を捕らえるものでなければならぬものと言えます。

それでは、コンクリート構造物の劣化原因として最も問題となる鋼材腐食を対象とした代表的な非破壊試験について述べることにします。

## 3. 非破壊試験

### 3.1 非破壊試験の概要

表-2は、コンクリート構造物の維持管理指針(案)(土木学会編)<sup>4)</sup>で示された劣化機構が特定された場合の点検方法の選択基準を示したものです。鋼材腐食を対象とした場合には、劣化原因は塩害あるいはコンクリートの中性化となります。ここでは、中性化試験や塩化イオン含有量試験のように局部的な破壊(はつり程度)を伴う試験も広義に非破壊試験と定義することにします。このように、非破壊試験には多くの試験方法がありますが、コンクリートの劣化状況やその原因を推定するうえで特に重要な情報を与えるもの、比較的実施される頻度が多く一般的なものを対象にして以下の方法について解説することにします。

① 鋼材の腐食状況を調べるための試験方法

表-2 劣化機構が特定される場合の点検方法の選択基準

| 点検方法                        | 原 理<br>試験項目など    | 劣 化 機 構 |        |        |          |             |     |
|-----------------------------|------------------|---------|--------|--------|----------|-------------|-----|
|                             |                  | 塩 害     | 中性化*2  | 凍 害    | アルカリ骨材反応 | 化学的コンクリート腐食 | 疲 勞 |
| 電気化学的方法                     | 自然電位法<br>分極抵抗法   | ●<br>○  | ●<br>○ |        |          | ○<br>○      |     |
| 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*1   | ●       | ●      | ●      | ●        | ●           | ●   |
| 打撃音法                        | 打撃音, 波形解析        | ●       | ●      | ●      | ●        | ●           | ○   |
| 反発硬度法                       | ハンマー反発硬度         | ●       | ●      | ●      | ○        | ●           | ○   |
| 赤外線法                        | 表面の赤外線映像         | ○       | ○      |        |          | ○           | ○   |
| 中性化測定法                      | フェノールフタレイン<br>pH | ●<br>○  | ●<br>○ | ○      | ○        | ○<br>○      |     |
| コア採取                        | 外観検査             |         |        | ●      |          |             |     |
|                             | 圧縮強度             |         |        | ○      | ●        | ●           |     |
|                             | 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<br>透気(水)試験 |         |        | ●<br>○ | ●        |             |     |
| 組成分析                        | 化学分析             |         |        |        |          | ●           |     |
|                             | DTA(示差熱分析)       |         | ○      |        |          | ●           |     |
|                             | XRD(X線解析)        |         | ○      |        |          | ●           |     |
|                             | EPMA             |         | ○      |        | ○        | ○           |     |
|                             | SEM              | ○       | ○      |        |          | ○           |     |
| 局部破壊法                       | 圧縮強度             | ○       | ○      | ○      | ○        | ○           | ○   |
|                             | 錆などの目視           | ●       | ●      | ○      | ○        | ●           | ○   |
| 超音波法                        | 伝播時間, 波形解析       | ●       | ○      | ●      | ●        | ●           | ○   |
| 衝撃弾性波法                      | 伝播時間, 波形解析       |         |        | ○      | ○        | ○           |     |
| マイクロ波法<br>(電磁波法)<br>(レーダー法) | 鉄筋配置             | ○       | ○      |        |          | ○           | ○   |
|                             | 空洞               | ○       | ○      |        |          | ○           | ○   |
|                             | 部材厚              | ○       | ○      |        |          | ○           | ○   |
| 電磁誘導法<br>(渦流法)              | 鉄筋配置             | ●       | ●      |        |          | ○           | ○   |
| 放射線法                        | 透過放射線画像          | ○       | ○      |        |          | ○           |     |
| A E法                        | イベント数, 波形解析      |         |        |        |          |             | ○   |
| 振動計測法                       | 固有振動数, 振動モード     | ○       |        |        | ○        |             |     |

凡例 ●:有効である, ○:参考となる有効なデータが得られる, 無印:参考になることもある  
注) \*1 変形, 変色, スケーリング, ひび割れの点検をも含む  
\*2 中性化とは, コンクリートの中性化による鉄筋腐食を指す。



- 自然電位法
- 分極抵抗法
- ② 腐食の原因あるいは劣化状況を把握するための試験方法
  - 塩化物イオン含有量試験
  - 中性化深さ試験
  - かぶり (電磁誘導法, 電磁波反射法)
  - ひび割れ深さ (超音波法)

3.2 非破壊試験方法

鋼材の腐食に関する非破壊試験では, 表-3に示す電気化学的なモニタリング手法がよく使われます。中でも, 自

表-3 鉄筋の腐食診断に関する電気化学的非破壊検査方法

| 測定法の種類 | 測定概要と腐食状況の推定                       | 適用性 | 精度 |
|--------|------------------------------------|-----|----|
| 自然電位法  | 鉄筋の自然電位を測定し, その腐食状況を推定             | ◎   | ○  |
| 分極抵抗法  | 微弱な電流を流し, その分極抵抗から測定時の鉄筋の腐食速度を推定   | ○   | ○  |
| 電気抵抗法  | コンクリートの抵抗率を測定し, 鉄筋の腐食状況を推定         | ○   | △  |
| 表面電位差法 | コンクリート表面の相対的電位差を測定し, その電位勾配から腐食を推定 | ◎   | △  |

然電位法は実用化の域に達し, それに次で分極抵抗法も近年盛んに研究が行われています。

(1) 自然電位法

電気化学的な手法の中で最も実用化が進み広く用いられているのが自然電位法です。この方法は, 「電解質環境中におかれる金属は, その環境と金属種の表面状態により固有の電位すなわち自然電位を示す」という原理を利用しています。

健全なコンクリートのpHは13程度でその中の鋼材は不働態皮膜におおわれているため, 腐食は起こりません。しかしながら, 塩化物イオンや二酸化炭素による中性化が原因で鋼材の保護皮膜が破壊され腐食が始まるようになると, 自然電位が低くなります (専門用語で, 貴の電位から卑の電位に移行したと表現します)。それゆえ, 自然電位を測定することによって鋼材の腐食状態を推定することが可能となります。

この手法は1950年代にコンクリート橋床版の腐食調査に初めて利用され, アメリカでは1977年にASTM規格C876-77として制定され, 1980年と1987年に改定され現在

に至っています。また、1991年にはBritish Standard (BS7361)も制定されています。日本では、1983年に日本コンクリート工学協会編集の「海洋コンクリート構造物の防食指針(案) -改定版-」の資料として自然電位法に関する測定基準案が紹介されています。

このようにこの方法はおおむね確立した手法と考えられます。しかし、測定上の問題点、たとえば、自然電位の測定結果の再現性の確認や、測定者が異なった場合の測定結果の相違など実務レベルで検討しておかなければならない課題も残されています。そこで、同一の構造物に対し、複数の測定者が、それぞれ別の測定装置を用いて、実際に自然電位を測定し、上述の問題点についての検討を行いました。ここに、検討結果の一部を紹介します。

試験に用いた供試体は、載荷試験後約10年間に陸部(塩害ではなく中性化による腐食が原因と考えられる地域)で屋外暴露されたコンクリート柱です。自然電位の測定は写真-1に示すように1.8m×0.8mの面積を対象として行いました。測定結果は自然電位の分布状態として、測定後かぶりをはつて鉄筋の腐食状況を調べた図面上等に電位線として表しています(図-6)。腐食の原因が塩害ではなかったため、腐食箇所の自然電位は後述するASTM規準で予想される電位より貴(高い)な電位となっています。しかしながら、腐食が広がっている部分には電位の谷が現れており、この方法による鉄筋腐食の検出が可能であることを示唆しています。しかし、この種の機器は、一般に操作が難しいため個人差や再現性の問題が付きまといま

図-7は同一地点において、異なる測定者が同一の機器

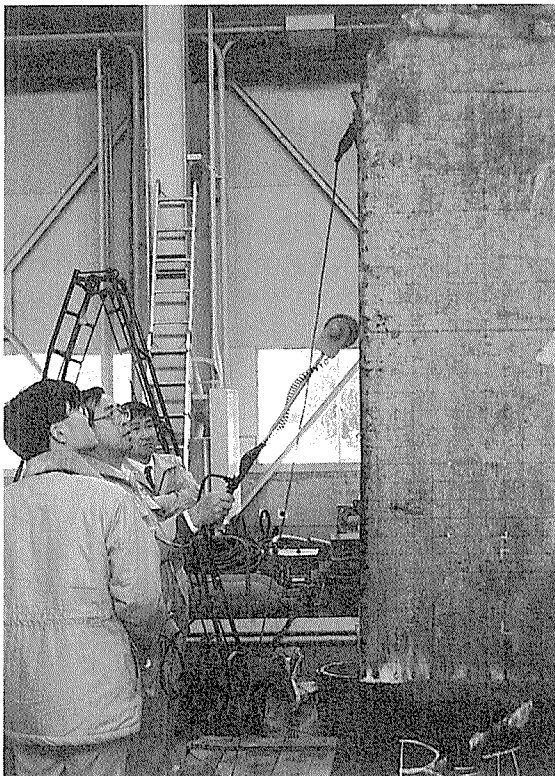


写真-1 自然電位の測定

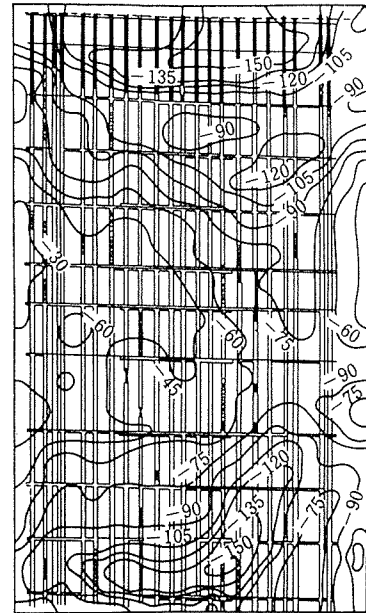


図-6 自然電位分布と鉄筋腐食状況  
(図中の曲線は等電位線を表す)

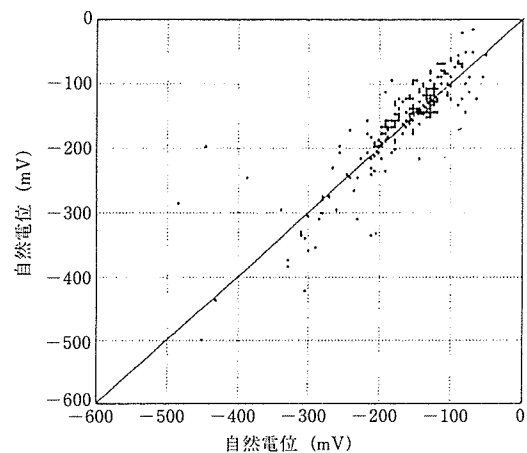


図-7 同一機器での測定結果(異なる試験者)

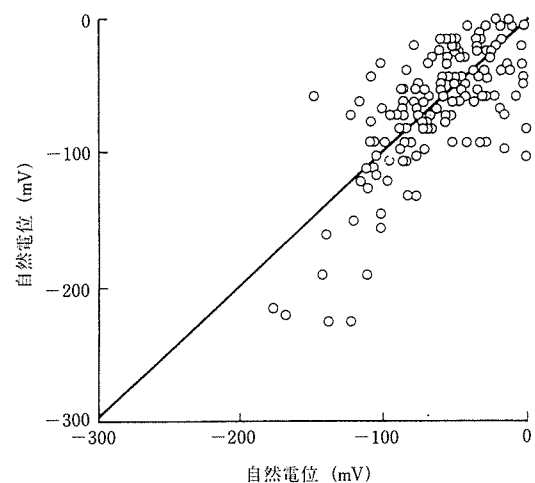


図-8 異なる機器での測定結果(異なる測定者)

を用いて測定した自然電位の値を縦・横軸にそれぞれ対応してプロットした結果を示しています。測定者が異なっても測定値はおおむね一致していることがわかります。一方、図-8は異なる測定者が異なる機器を用いて同一地点で計測した結果を表しています。これらの結果から判断すると自然電位の測定値には30～50mV程度の誤差が含まれるようです。

(2) 分極抵抗法

コンクリート中で鋼材が腐食すると、鋼材表面には電気化学的反應によって腐食電流が発生し、錆が生成します。この腐食電流は鋼材の腐食速度を表すもので、鋼材の腐食状況を評価するために重要な情報となります。この電流は鋼材表面に起こる電流であるため直接測定することはできません。そこで、図-9に示す装置で分極抵抗を求め、腐食電流を推定することが行われています。

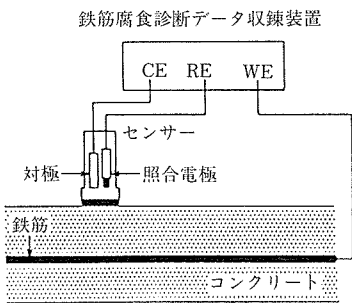


図-9 測定方法の概要

図-10は鋼材の腐食が進行するときの腐食電流の経時変化の概念を示したものです。腐食電流は経時的に変化するため、腐食の将来予測を行う場合には、定期的な測定を行わなければなりません。

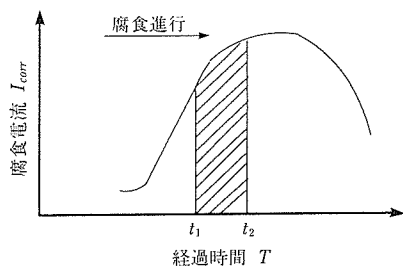


図-10 腐食電流の経時変化概念図

このように、電気化学的な手法はコンクリート表面から内診できる理想的な非破壊試験と言えますが、その操作方法や測定の条件を十分熟知したうえで測定しないと信頼性のあるデータを得ることはできません。それぞれ測定上の留意点がありますが、共通している重要なポイントを列挙すると次のようになります。

- ① 測定箇所すなわちコンクリート表面と鉄筋の間に不連続部（浮き、ひび割れ、空隙）が存在しないことを確認する
- ② 測定部位の環境を整えるため事前に湿潤状態とする
- ③ 腐食の判定精度を高めたい場合は、部分的なはつり・鉄筋の腐食状況の確認を行い、測定された自然電位の値との照合を行います。

鋼材はコンクリート中で保護皮膜に包まれている限り腐食しないことは、すでに述べたとおりです。

塩化イオンの浸透や中性化が進むことにより健全な環境が破壊され、ついには鋼材腐食に至ります。次に紹介する非破壊試験は電気化学的方法のように直接腐食の状況を推定することはできません。しかし電気化学的手法と併用することによって腐食が生じていた場合にはその原因を、腐食が生じていない場合でも、鋼材腐食の危険性を判断するための貴重な情報となります。

(3) 塩化イオン含有量試験

鋼材位置での塩化イオン含有量を知ることで、鋼材が腐食環境下にあるのかないのかを判断することが可能となります。

硬化コンクリート中に含まれる塩分測定用コアの採取は、JCI-SC8の方法によって行われるのが一般的です<sup>5)</sup>。

コアが採取できない場合には、図-11のようにドリルで粉末を採取する方法もあります。この場合、骨材の影響が出ない程度のサンプル量が必要となります。

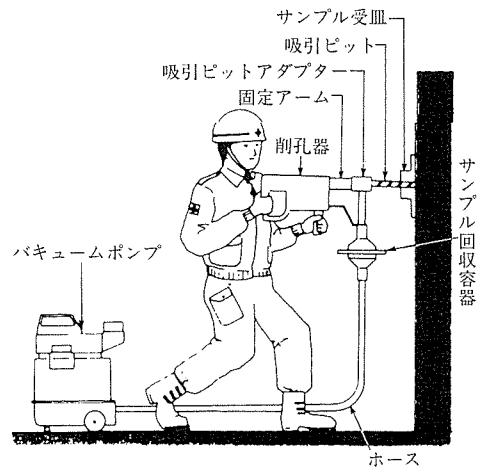


図-11 粉末サンプリングドリルの例

塩化物の分析は、硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（JCI-SC4）あるいは硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法（JCI-SC5）に準じて行います。現時点では塩害の判定基準が全塩分を対象に行われているため、この分析も全塩分を対象として行っておくことが必要です<sup>5)</sup>。

一方、塩化物の正確な値よりどこまで塩分が浸透しているか簡単に調べたい場合には、コンクリートに直接フルオレセインナトリウムを噴霧する発色法（フルオレセイン法）が有効です。

全塩分量の分析には時間と費用がかかるため、可溶性塩分を現地で容易に調べる方法として、ホットプレート法、ボイル法などもモニタリング手法として有用です。この場合には、硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（JCI-SC4）と可溶性塩分分析結果との対応付けが必要となります。

なお、コアやドリルによってサンプルを採取する場合、コンクリート中の鋼材を切断しないよう、事前に後述

する非破壊試験によって鉄筋やPC鋼材等の位置を調査しておくことが肝要です。

#### (4) 中性化試験

コンクリートの中性化が鉄筋位置まで進行していると鉄筋が腐食しやすい状態にあることは前述のとおりです。

中性化深さは、鉄筋のかぶり深さまではつり、そこに直接フェノールフタレイン溶液を噴霧し、発色部分のコンクリート表面からの距離を測定することによって求めます。

塩化物の測定用に採取したコア(図-12)あるいはその穴、または粉体サンプル用のドリルの穴を利用すると中性化深さ試験用のはつりは不要となります。



図-12 中性化深さの試験

#### (5) かぶりと鋼材位置の測定

鋼材腐食の原因となる中性化や塩化イオンの浸透はコンクリート表面から進行しますので、耐久性を確保するために、設計時にかぶりの検討が行われます。しかし、施工にかぶり不足が起こるとコンクリート構造物の劣化が早期に発生することになります。したがって、かぶりを測定することは、構造物の耐久性を判断する非常に重要な情報を得ることになります。

さらに、鋼材腐食に関する非破壊試験では測定に先立って鉄筋の位置、かぶりなどの配筋状態を知ることが大切です。このように、かぶりと鋼材位置の測定は、これら非破壊試験の予備試験としての側面もあわせ持っています。これらの測定に用いられる非破壊試験方法について以下に示します。

##### 1) 電磁誘導法

電磁誘導法は、図-13<sup>6)</sup>に示すようにコイルが巻かれたプローブ(検査、探査などの装置)に交流電流を流して交流磁場を発生させます。その磁場内に鉄筋が存在すると鉄筋に起電流が発生し新たな磁場が発生します。この磁場によってコイルに電流が発生しコイル電圧に変化が生じます。この電圧変化を測定すること

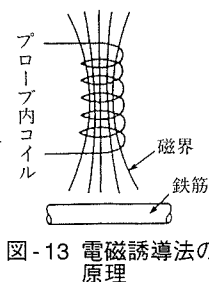


図-13 電磁誘導法の原理

によって鉄筋の位置・かぶり・径などを推定する仕組みになっています。

この方法によって検出することのできる鉄筋は外側に配筋された鉄筋のみで、多段配筋の内側の鉄筋やPCのシース等の検出は不可能です。いずれにしても、鉄筋の腐食は外側の鉄筋から発生することを考えれば、実用的には問題ありません。

一般的に、かぶりを推定するためには、鉄筋の径が既知である必要(一部の機器では、径の推定も可能)がありますので、設計図書等があれば大変便利です。

##### 2) 電磁波反射法

電磁波反射法はレーダー法とも呼ばれます。図-14のように送信器からコンクリートに向けて放射された電磁波が鉄筋や空洞などコンクリートと電気的に異なる物質の境界面で反射され受信器に到達するまでの時間を計測して鉄筋の位置とかぶりを推定します。

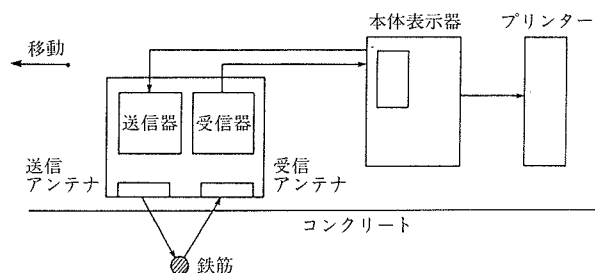


図-14 電磁波反射法の機器構成

電磁波反射法では、エコー波が発生しますので図-15のようにエコー波の処理を行う必要があります。

電磁誘導法と電磁波反射法は、一般にかぶりが200mm以内、鉄筋径が6mm以上で鉄筋間隔が100mm程度以上で配置されている鉄筋の検出に適しています。この場合、鉄筋位置とかぶりの推定誤差はそれぞれ±10mm程度、±10%程度と考えられます。

##### (6) ひび割れ深さ

コンクリート構造物に発生するひび割れは、種々の情報を我々に与えてくれます。従来、コンクリート構造物の点検・調査はひび割れの発生状況を中心として行われてきました。つまり、ひび割れのパターンとひび割れ幅を調べることで劣化の原因と劣化の程度を判断していました。さらに、ひび割れがどこまで到達しているのか、ひび割れ深さに関する情報が得られれば、ひび割れの影響をより良く判断することができるようになります。

ひび割れ深さの非破壊試験には超音波伝播速度法、衝撃弾性波法などがあります。

このうち、最も古くから実施されてきたものは、図-16に示す超音波の伝播時間を基にひび割れ深さを推定する方法で、BS法のようにすでに標準化されている手法もあります。

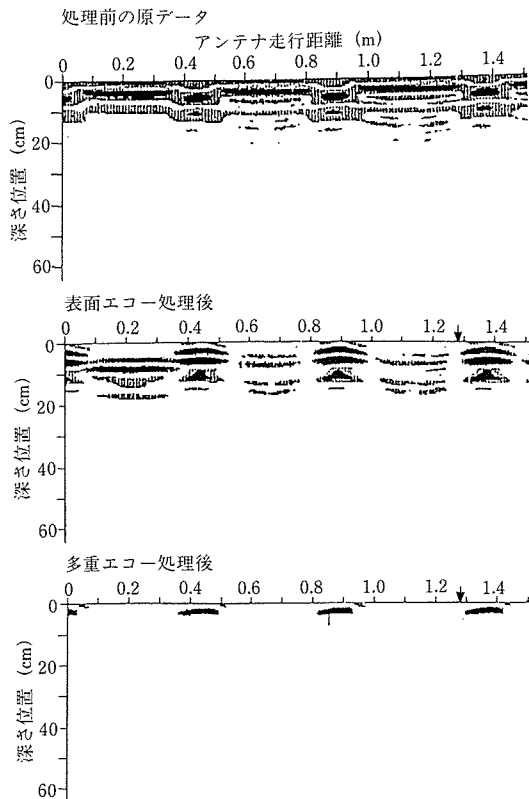


図-15 電磁波反射法によるエコー処理

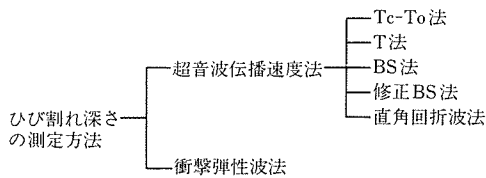


図-16 ひび割れ深さの測定方法

1) Tc-To法

Tc-To法は、測定対象のコンクリート構造物のひび割れ部と健全部から得られるデータを用いるとそこにその特徴があります。

図-17は、その測定方法を示していますが、健全部および深さ $d$ のひび割れ部で測定される超音波法の伝播時間 $T_0$ 、 $T_c$ を求めることで、ひび割れ深さが計算されます。

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{(T_c/T_0)^2 - 1} \quad L: \text{探触子間の距離}$$

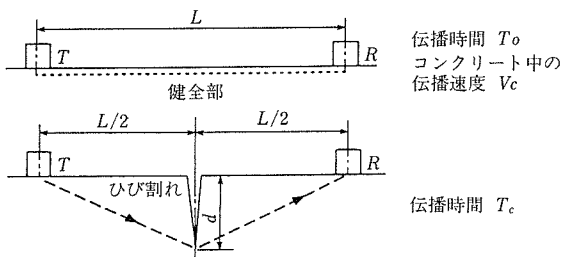


図-17 Tc-To法測定図

2) BS法と修正BS法

BS法および修正BS法の特徴は、ひび割れ部分を中心に送信探触子と受信探触子を定間隔(150mm・300mmあるいは $a, na$ )に設置し、各々伝播時間を求める点にあります(図-18)。なお、修正BS法とは、BS法を各研究者がアレンジしたものの総称で、BSにおいて明文化されたものではありません。

$$d = \sqrt{\frac{n^2 t^2 - t_1^2}{t^2 - t_1^2}}$$

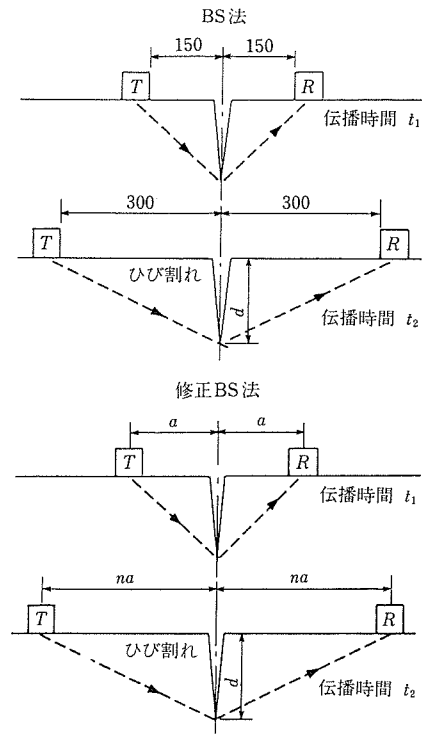


図-18 BS法および修正BS法測定図

超音波伝播速度によってひび割れの深さを計算する場合、いずれの方法とも超音波が発進側の探触子からひび割れの先端に直進し、ひび割れ先端から受信側の探触子に直進する経路を通ることを前提としています(図-19)。

鉄筋の影響やコンクリート表面を伝播する超音波を受信したり、ひび割れがコンクリート面に対して直角になっていない場合には、その前提条件が満たされないため計測精度が低下します。このような問題を回避するために、受信波形を観察し、これらの影響を取り除く方法も検討され

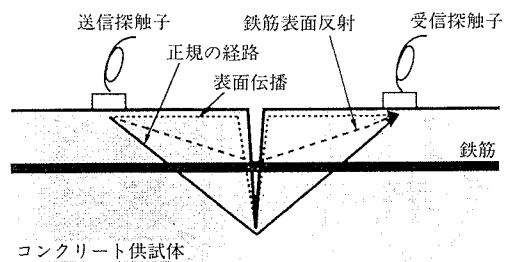


図-19 コンクリート中での超音波の伝播経路

ています。

最近では、超音波伝播時間法が持つこのような欠点を解消するために、直角解析法<sup>7)</sup>や超音波スペクトロス<sup>8)</sup>コピー法といった新たな測定手法が開発されつつあります。

#### 4. 健全度診断

##### 4.1 概要

従来の目視点検を主体とした健全度評価(たとえば、表-1)方法でも、ある程度の成果は得られますが、先にも述べたとおり、構造物にひび割れが発生したりさび汁が発生するなど、損傷が顕在化するまでは目視点検は有効に機能しないといった問題点があります。また、目視点検結果から評価を行う場合、評価結果には点検に当たる技術者の主観が多分に含まれ、客観性に欠けるといった問題点もあります。目視調査に加え、非破壊試験をこれに付け加えることができれば、このような欠点を補うことができます。

非破壊試験は繰り返し測定することが可能であると同時に測定結果が定量的に与えられるため、精度の良い測定が行われれば、客観的に構造物の健全度(あるいは劣化度)を判断することができるようになります。したがって、これらの手法を従来の点検に組み入れることでより効率的なデータの収集が可能となります。構造物の健全度の推定は点検結果から判断された劣化度を適切に評価することで行われます。ここでは用語の混乱を避けるため、以下劣化度の判定として検討していくことにします。

構造物の劣化度は、評価時点でそれぞれの性能がどの程度低下しているかを判断する指標となります。劣化度は、劣化の状況・進行過程の構造物に要求されている性能に対する影響の度合いを、理論的かつ定量的に評価することで判定するのが理想的です。劣化度の合理的な判定手法は、現在研究開発が進行中です。以下に、これまでに提案された方法について紹介します。

##### 4.2 グレーディングに基づく判定

土木学会のコンクリート構造物の維持管理指針(案)ではグレーディングによる劣化度の評価方法の考え方が示されています。

この指針では、構造物の機能を①耐久性②機能性③耐荷性および④周辺環境への影響性の4つの性能で評価することとしています。4つの性能とそれに関連する点検項目のデータをそれぞれG1, G2, G3の3段階に分類し、4つの性能への影響の度合いを勘案して、総合的な評価指標(0.0~1.0)を求めます。この値が0.0に近いほど健全であり、逆に1.0に近づくほど劣化度が大きくなるようになっています。そして、評価指標の値があらかじめ設定された限界値を超えた場合には、構造物が十分に健全であるとは言えないと判定します。

##### 4.3 劣化度判定の試み

土木学会のグレーディングは、4つの性能に対して総合的に評価・判定を加えることを基本としており、現在、その考え方が示された段階で、今後のデータの蓄積が必要と

されます。

非破壊試験に基づく劣化度の診断手法が定着するためには、この診断結果に信頼性があり、診断結果が具体的な維持管理におけるアクション(たとえば、モニタリングの強化・補修の決定など)に結びつくものでなければなりません。これが完成されなければ、非破壊試験は、その位置づけが不明確となり、いつまでも目視点検に付随して余裕があれば実施するといった付属的な扱いにとどまり、実際に非破壊試験が行われる頻度は非常に少なくなるものと考えられます。

一方で、非破壊試験に基づく構造物の診断の有効性・判定精度の向上にあたって最も重要なことは、実際に非破壊試験を行い、試験データの蓄積をはかることに尽きます。実構造物に非破壊試験を適用した事例を増やさない限り、診断の有効性・判定精度の向上は望めません。

したがって、このような悪循環を断ち切り、維持管理プロセスにおいて非破壊試験・診断を定着させるためには、工学的に妥当であると考えられる範囲で、とりあえず診断手法を確立することが重要であるといえます。これを一種のたたき台とし、ある程度の経験・データの蓄積ができた段階で、一部修正・改良を施し、より一層の診断精度の向上をはかればよいと考えます。幸い、近年のコンクリート構造物の耐久性に関する研究は大幅に進歩していて、幅広い知見が得られています。これらの研究成果を十分ふまえることにより、少なくとも目視点検のみに頼りよりも合理的な診断手法ができあがるものと確信します。

このような考え方に基づいた健全度診断マニュアルが必要となります。

健全度診断マニュアルを作成する場合、非破壊試験と一口に言っても、適用する場面によって非破壊試験に期待するものが異なることを認識しなければなりません。構造物に生じ始めている劣化を見逃すことなく検出するために実施する非破壊試験・健全度診断と、構造物の損傷が顕在化した際に、補修の要否・補修方法・補修規模を判断するために非破壊試験・健全度診断とは必ずしも同一のものではないと考えられます。人間の場合にたとえていうと、10年に一度行う健康診断のような意味合いの非破壊試験と、体調に異常が認められてから病院で行う精密検査的な意味合いの非破壊試験では、自ずとその性格が異なっているということです。非破壊試験の実施方法や実施項目の選定はもとより、そのアウトプットに対する評価も当然異なります。健康診断的に実施する非破壊試験・診断では、次の項目が重要となります。

- ① できるだけ簡便に行える試験に限定する。構造物に損傷を与える方法は採用しない(たとえばコアの採取など)。
- ② 試験項目・試験部位も必要以上に増やさない。
- ③ 軽微な損傷を把握しうる試験を主とする。
- ④ 得られた試験結果から、構造物の健全度がグレーゾーンに入ると考えられる場合は、以後の監視体制



を強化する。

この判断を的確に行うことに目標を置く。一方、損傷が明らかになったのち、あるいは定期検査で異常がありそうだと判断されたのちに行う非破壊試験では

- 劣化原因を確定する。
- 構造物に損傷を与えうる試験法でも必要に応じてこれを行う。
- 判定精度を向上するため、はつりによる確認も辞さない。
- 利便性よりも判定精度の向上に力点を置いて、試験法の選択・試験結果の評価を行う。

といった項目が重要になると考えられます。したがって、健全度診断マニュアルの作成に当たっても、その適用場面に応じて2つの章に大別して整理することが大切です。

種々の劣化のうちで構造物の機能に対し最も影響度が高いのは、補強鉄筋・鋼材の腐食であるといえます。自然電位の測定による腐食状況の判断は、最も直接的な指標となります。したがって、自然電位の測定結果のみでも、健全度の診断はある程度可能かもしれません(表-4)。しかし、鉄筋・鋼材の腐食を生じさせる原因となる塩化物の含有量や、中性化の進行状況も合わせた健全度の評価とすることにより、診断の精度が向上することは言うまでもありません。したがって、健全度診断マニュアルでも、単一の指標(試験結果)のみによって健全度を診断するのではなく、複数の指標を総合的に判断した診断結果が得られるようなものを目指さなければなりません。

ただし、複数の指標を総合して一つの診断結果を導くことは、先にも述べたとおり、現状では非常に困難な問題であり、高度な工学的判断を要します。この点については、種々の文献・研究成果を基に解決することが必要です。判断結果の妥当性については、今後非破壊試験が定着しデータが蓄積された段階で、多少の修正を行う必要が生じるかもしれません。

表-4 ASTM規格とBS規格(自然電位:CES規準)

| 腐食<br>ランク | ASTM規格               |                    | BS規格              |
|-----------|----------------------|--------------------|-------------------|
|           | 自然電位<br>E(mv)        | 腐食確率<br>P(%)       | 腐食確率<br>P(%)      |
| I         | $E > -200$           | 90%以上の確率<br>で腐食なし  | 5%以上の確率で<br>腐食なし  |
| II        | $-200 \geq E > -350$ | 不確定                | 50%               |
| III       | $-350 \geq E$        | 90%以上の確率<br>で腐食なし  | 90%以上の確率<br>で腐食なし |
| (IV)      | $-500 \geq E$        | 約半数の供試体<br>にクラック発生 |                   |

## 5. あとがき

非破壊試験はなぜなかなか普及しないのでしょうか。非破壊試験方法は、原理や操作が難しく、専門家でないとお操作できにくい方法であることがまず第1の原因と考えられました。

さらに、費用とコストが上昇する反面、精度も不明なことや、4.で述べたごとく、結果の評価・判定が体系化されていないことも普及をこぼむ大きな要因であることが分かりました。

現在ある非破壊試験には実用化の域に達したのもあれば、まだ研究段階のレベルにあるものまで様々です。

しかしながら、この方法は何回でも測定が可能であること、および定量的なデータが得られるために、従来の目視点検では不可能であった構造物の劣化を経年変化としてとらえられるため、人の健康診断と同様に劣化の兆候をいち早く発見することが可能になるものと期待されます。ただ、非破壊試験を用いた健全度の診断が有効に機能し実用化に至るには、診断に携わる技術者が、非破壊試験の内容に十分精通しているとともに、これまでコンクリート工学の分野で培われてきたコンクリート構造物の劣化に関する知識も身につけていることが前提となります。いずれが欠けていても適切な健全度診断は不可能であることを、心にとどめておく必要があります。

以上、非破壊試験の現状について理論的と言うよりはむしろ実務的な立場に立って紹介してまいりましたが、非破壊試験に関する読者の理解の一助になれば幸いです。

### 参考文献

- 1) 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-コンクリート構造物の非破壊検査マニュアル-, 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室, 日本構造物診断技術協会, 1994. 7
- 2) コンクリート構造物の補修事例集 土木研究所彙報第49号: 建設省土木研究所, 昭和63年11月
- 3) 塩害を受けた構造物の補修指針(案), 建設省総合技術開発プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書<第二編>, 建設省, 1988. 11
- 4) コンクリート構造物の維持管理指針(案), コンクリートライブラリー-81, 土木学会
- 5) 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), JCI, 1993. 3
- 6) 魚本他, コンクリート構造物の非破壊検査, P104, 森北出版
- 7) 山口他, コンクリートのひび割れ深さと厚さの測定法, 第12回コンクリート工学年次講演会論文集, JCI, 1990
- 8) 大津政康, 超音波でRCのひび割れ深さを評価する, セメント・コンクリート, No. 530, 1991. 4