

# 第3回 ひび割れ・剥離・空洞（その1）

講師：内田 昌勝

## 1. 非破壊検査方法の種類と適用分野

コンクリート構造物で一般的に適用される非破壊検査方法を分類すると、コンクリートの圧縮強度、欠陥検出および鉄筋の腐食度などの劣化状況に関わるものと、部材寸法や鉄筋の配筋状態などの構造耐力に関わるものに分けることができます。この各調査対象と一般的な非破壊検査方法の関係は、図-1のように整理することができます。

コンクリート構造物の診断では、構造物にダメージを与えることなく、幅広く検査することができる非破壊検査方法は有効な方法です。しかし、コンクリート構造物のすべてを網羅できる万能な非破壊検査方法の確立は難しく、実際には調査する対象に応じて最適な検査方法を単独あるいは組合せて選定する必要があります。

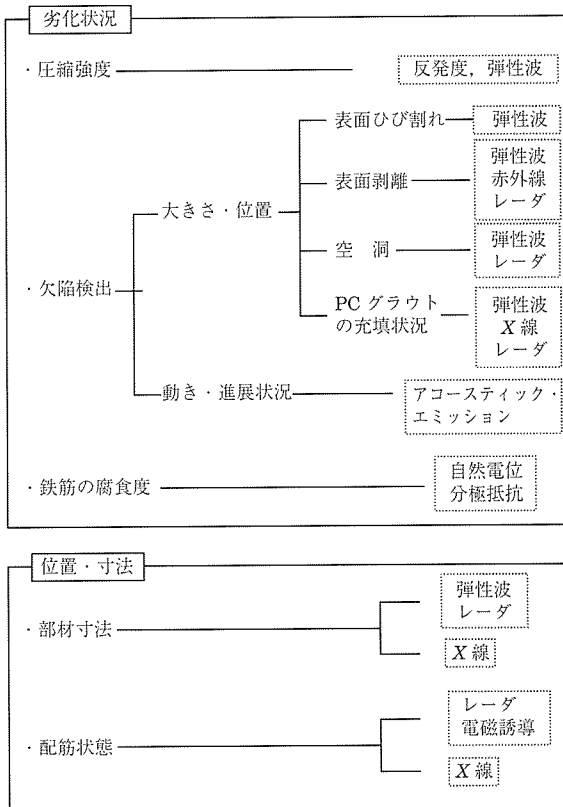


図-1 非破壊検査方法の分類

本号では、コンクリート構造物の非破壊検査方法の中で欠陥検出に関係する弾性波法を中心に紹介します。

## 2. 弾性波とは

弾性波とは、文字どおり弾性体を伝播する波動を意味します。この弾性波には、弾性体に関するさまざまな情報が含まれているので、コンクリートの欠陥検出技術に幅広く適用されています。

弾性波を用いた非破壊検査方法は、欠陥の位置や大きさを調べる方法と欠陥部の動きや進展状況を調べる方法があります。前者は、超音波法、衝撃弾性波法および打音法に分類され、弾性波の伝播時間、最大振幅値の変化、周波数応答などからコンクリート構造物内部の欠陥を評価するのに用いられます。後者は、アコースティック・エミッション（AE）法とよばれ、コンクリート内部で進展する微小な破壊現象や欠陥部の動きを評価することができます。

超音波法とは、弾性波の送受信に圧電効果を利用したセンサを用いる方法です。一般に超音波とは可聴域（約20 Hz～20 kHz）より高い周波数と定義されますが、コンクリートではこのような周波数の帯域に関係なく超音波法と定義され、実際には10～100 kHzの範囲のものが広く利用されています。衝撃弾性波法は、表面にハンマや鋼球などで機械的に衝突させたときに生じる衝撃弾性波を表面に設置した加速度センサや変位センサなどによって受信する手法と定義されています。打音法は、可聴域にある周波数の低い弾性波を対象としており、衝撃弾性波をマイクロフォンなどの音響機器によって受信する方法です。

AE（Acoustic Emission）法は、ひび割れ発生時やPC鋼材の切断時に、コンクリート内部から発生する弾性波を高速に収録し、解析する手法です。AEの計測装置は、パソコンの高速化に伴って、より多くの情報をデジタル情報として記録・処理することが可能となっています。

図-2に弾性波法の各手法の相互関係を示します。

今回は、コンクリート構造物の欠陥評価手法の中で、表面ひび割れの深さ、ひび割れの進展状況、PCグラウトの充填状況およびPC鋼材の破断音の検出方法などについて紹介します。

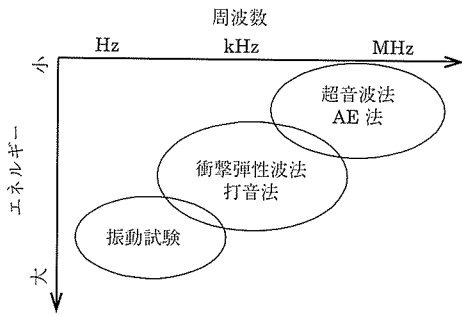


図 - 2 各弾性波手法の相互関係<sup>1)</sup>

### 3. 弾性波法による欠陥評価技術

#### 3.1 表面ひび割れの深さ

コンクリート表面から内部に向かって発生するひび割れ深さは、超音波法がもっとも効率良く評価することができます。ひび割れを挟んで超音波のセンサを配置した場合、弾性波はひび割れを迂回して伝わるため、ひび割れのない健全部より伝播する時間が長くなります。このような性質を利用して、式(1)を使ってひび割れの深さを評価することができます(図-3)。ただし、ここで評価する弾性波は、伝播速度がもっとも速い縦波(P波)であることに気をつける必要があります。

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{\left(\frac{t_c}{t_o}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

$d$  ; ひび割れ深さ,  $L$  ; センサ間隔,  $t_c$  ; ひび割れ部の縦波の伝播時間,  $t_o$  ; 健全部の縦波の伝播時間

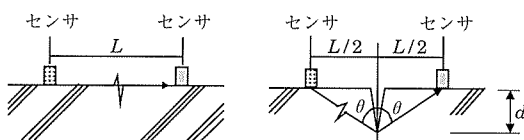


図 - 3 コンクリート中を伝播する弾性波

さて、実際の構造物では、ひび割れが斜めに発生している場合があります。これまでの計測方法では、十分な評価が困難でした。しかし、ひび割れを迂回する弾性波の挙動について調べていくと、ひび割れが斜めに発生しても図-4のように、発信された弾性波は、ひび割れの先端部と受信するセンサを結ぶ最短の縦波伝播経路長 ( $l_i$ ) を伝播することがわかりました。また、この関係は 式(2)で評価することができます。

$$l_i = L_i \frac{t_c}{t_o} \quad (2)$$

$L_i$  : センサ間距離       $l_i$  : 縦波伝播経路長  
ひび割れの深さを評価する場合は、センサ間距離 ( $L_i$ ) を一定とし、発信センサとひび割れまでの距離 ( $P_1, P_2$ )

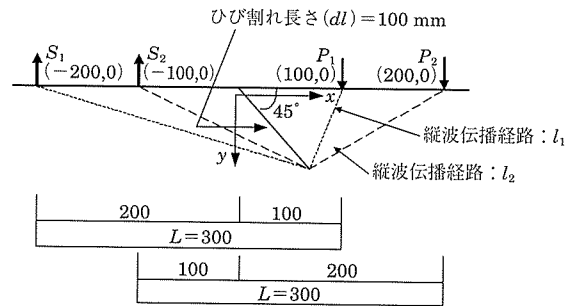


図 - 4 斜めひび割れを伝播する弾性波

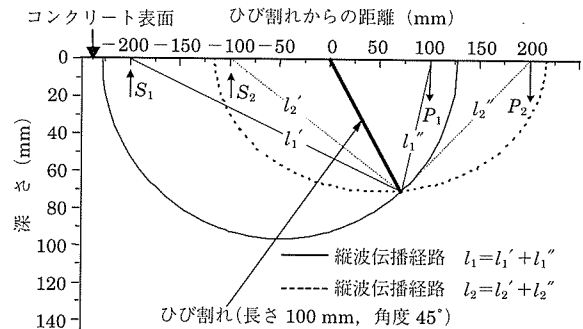


図 - 5 斜めひび割れの評価方法

と受信センサとひび割れまでの距離 ( $S_1, S_2$ ) を変化させて、縦波の伝播時間を測ることで、図-5のような2本の縦波の伝播経路曲線(楕円)が求められ、その曲線の交点がひび割れの先端部と評価できます。

表-1に実験結果を例示しますが、本法によって斜めに発生したひび割れを評価できることがわかります。

表 - 1 斜めひび割れの評価結果

実測値		推定値		推定値 / 実測値	
角度	深さ(mm)	角度	深さ(mm)	角度	深さ
45°	70.7	40.3°	69.6	0.90	0.98
60°	86.6	62.0°	94.2	1.08	1.09

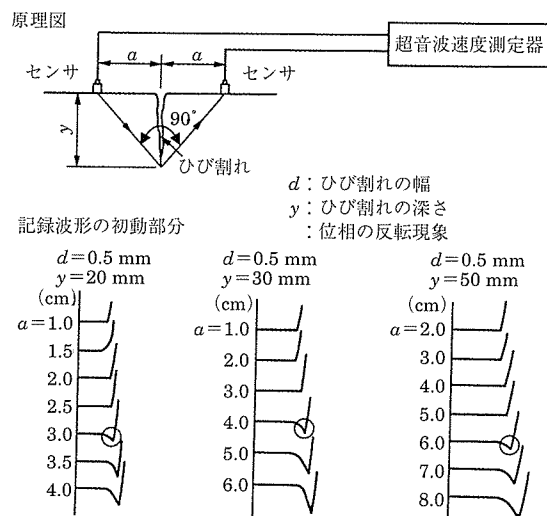


図 - 6 位相変化によるひび割れ深さ測定<sup>3)</sup>

また、ひび割れを伝播した縦波の位相の変化により、ひび割れの深さを評価する方法もあります。この方法は、ひび割れを挟んで弾性波を伝播させると、ひび割れの先端で回折が生じ、その回折角度  $90^\circ$  を境に波の性質が変化して、受信した縦波の位相が変化することを利用した方法です(図-6)。センサの位置を移動して、回折角度が  $90^\circ$  となるセンサの位置を見つめることができれば、センサとひび割れまでの距離 (a) がひび割れ深さとなります。

このほかにも、ひび割れ深さを評価する方法は提案されておりますが、いずれの手法を用いてもひび割れと鉄筋までの距離やひび割れの幅などにより適用できる範囲がありますので、実際に調査する際にはこれらの影響を十分に配慮する必要があります。

### 3.2 ひび割れの進展状況

コンクリート構造物の維持管理を合理的に行うためには、構造物の状態を的確に把握し、劣化・損傷度を早期に発見して、その機能を維持するために点検を行う必要があります。とくに、ひび割れの進展状況を把握することは、補修・補強工事の時期を決定するうえで重要な項目の一つです。材料内部の微小破壊の検出技法として開発されてきた AE 法は、構造物に発生するひび割れの動きや進展状況を唯一評価できる検査方法です。この測定は、コンクリート表面にセンサを取付け、その信号を増幅して高速のデータ収録装置で計測し解析します。

構造物から検出される AE 波には、ひび割れがいつ・どこで・どのように動いているかを知るための情報が含まれています。しかし、コンクリート構造物の診断をするうえで、ひび割れの種類の特定は重要であり、簡易に評価できる手法の確立が望まれています。

コンクリートに発生する代表的な 2 種類のひび割れは、引張(開口)型およびせん断(ずれ)型と大別できますが、これらのひび割れが発生するとき、それぞれ特徴的な AE 波が発生することがわかってきました。

図-7は、計測された AE 波から二つのパラメータを選び解析した結果を、引張型およびせん断型ひび割れ別にプロットしたものです。ここで、RA 値は AE 波の形状変化を、平均周波数はその AE 波の周波数特性を表すパラメータです。このように、これらのパラメータを利用することで、収録された AE 波からどのようなひび割れが発生している

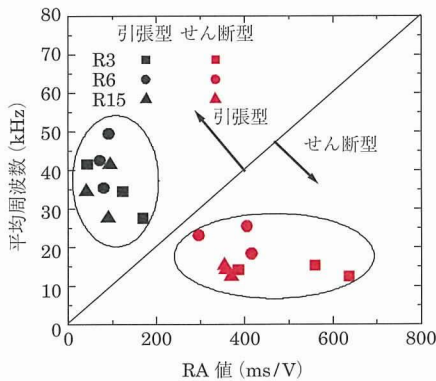


図-7 ひび割れ種類の簡易識別方法

か簡易に識別できます。

引張(開口)型の信号が検出された場合、コンクリート内部でひび割れが新たに進展していると考えられます。また、せん断(ずれ)型の信号が検出されたときは、すでに発生していたひび割れ界面が何らかの理由で擦れあっているか、あるいは鉄筋とコンクリート間でずれが生じていると判断することができます。この方法は、維持管理方法を選定するうえで貴重なデータを提供することができ、実際に道路橋脚の診断で利用されています。

### 3.3 PC グラウトの充填状況

PC グラウトの充填状況の評価技術は、X線法なども適用されていますが、ここでは弾性波法による PC グラウトの充填状況の調査技術を紹介します。

#### (1) 弾性波の伝播速度による評価

この方法は、緊張材の端部の一方よりハンマや鋼球などを利用して弾性波(衝撃弾性波)を入力し、反対側で検出した弾性波の伝播速度により、グラウトの充填状況を判断するもので、PC グラウトが充填されていないと弾性波速度は鋼材の伝播速度(5000~5500 m/s)に近くなりますが、グラウトの充填率が高いほどコンクリートの伝播速度に近づく特性を利用しています。

図-8は、グラウト充填度の異なる試験体(PC鋼棒)で実際に計測された弾性波伝播速度と理論解析結果の関係を示したものです。解析値の方が若干小さい値を示していますが、実験・解析ともにグラウト充填率が増加するほど弾性波伝播速度が低下する傾向が確認できます。

この方法は、すでに PC タンクのグラウト充填検査に利用され有効性が確認されております。

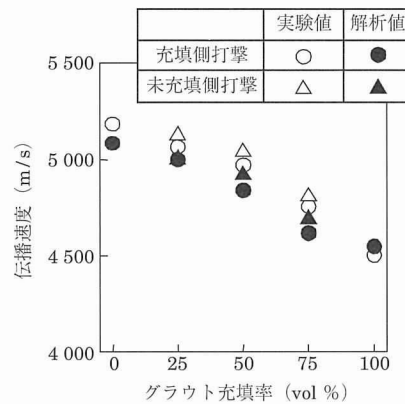


図-8 グラウト充填率と弾性波伝播速度の関係<sup>3)</sup>

#### (2) 周波数応答を利用して評価する方法

最近、周波数応答を利用してコンクリート中の欠陥を評価する方法として、衝撃弾性波法の一つであるインパクト・エコー法が開発され注目されていますが、グラウトの充填状況を明瞭に区別することができません。そこで、グラウトの充填状況を判断するため、高周波数でエネルギーの大きな弾性波を入力して、空隙より反射する信号を画像化するスペクトル・イメージング手法(SIBIE; Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact - Echo)<sup>4)</sup>

が開発されています。この技術は、コンクリートの表面(片面)から内部の評価ができることが特徴です。

SIBIEの原理は、周波数スペクトルの測定値を基に、弾性波が不連続面で反射した挙動をコンピュータ解析によりイメージング処理を行い、弾性波の反射位置を画像化することです。

図-9はPC鋼棒による横締めを想定したモデル試験体とSIBIE法の適用性を検討した結果です。試験体は、直径38mmの鋼製シースに直径32mmのPC鋼棒を配置し、空隙部にグラウトを充填したものと鋼棒のみの2条件で実験した結果、グラウト充填部ではシースの周辺からの強い反射が検出されなかったのに対し、未充填部ではシース前面より強い反射波が確認されました。

このように、空隙の少ないPC鋼棒においても、鋼棒周辺に空隙が存在していれば、SIBIE法によってグラウトの未充填状況を評価できることがわかります。

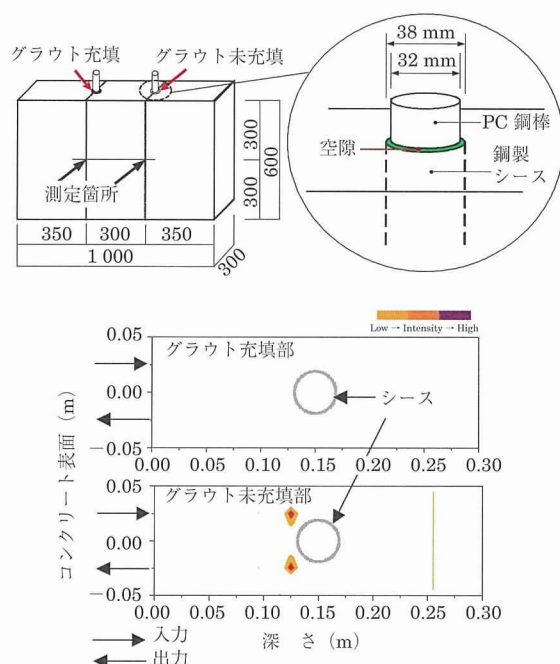


図-9 SIBIEの解析結果

### 3.4 PC鋼材の破断検出

PC構造物の維持管理手法の一つとして、PC鋼材の破断をAEセンサなどで検出する手法の検討が進められており、破断箇所を特定するシステム<sup>5), 6)</sup>が紹介されています。実際に長期間モニタリングするためには、データの信頼性を確保する必要があります。

まず、PC鋼材の破断音と車両通行などにより発生する振動を区別する必要があります。図-10は、大型車両の通行量が多い橋梁で計測した車両通行時の振動と長さ20mのPC桁の鋼材を電食およびサンダーで切断したときに4~16m離れた位置で検出した破断音の最大振幅値とエネルギーの関係を示したものです。このように、PC鋼材が破断したときに発生する破断音は、車両により発生した振動音と比較して、エネルギーが大きいため16m離れた場所でも、

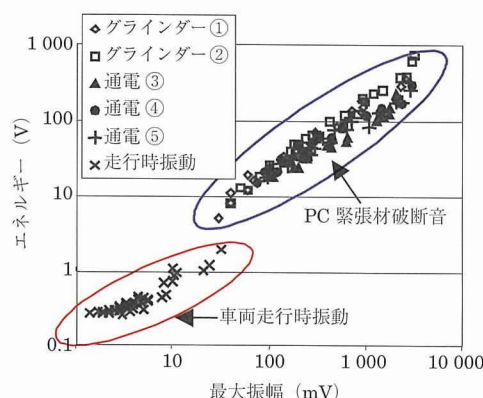


図-10 PC緊張材の破断音と走行音振動の関係<sup>7)</sup>

十分に検出できることがわかります。

なお、実際に長期間のモニタリングを行う場合、連続使用時の装置の信頼性を確保する必要があります。そこで、使用する各AEセンサに自己診断機能を付加し、PC鋼材の健全性を常時モニタリングでき、現在実橋にて信頼性試験を行っています。図-11が、自己診断機能を付加した常時モニタリングシステムの機器です(日本セラテック社製)。



図-11 PC鋼材の健全性モニタリングシステム

## 4. 終わりに

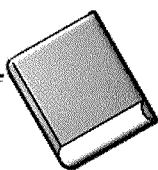
今回は、弾性波を用いた非破壊検査方法のうち、ひび割れ深さ、ひび割れの進展状況、PCグラウトの充填状況およびPC緊張材の破断音の検出方法を紹介いたしました。非破壊検査技術は、まだ万能な方法ではあるとはいえませんが、適用範囲を認識したうえで利用していけば、コンクリート構造物の維持・補修のための重要な情報を得ることができます。今回の内容が、皆様の業務の一助になれば幸いです。

次回は、各種非破壊検査方法を用いた剥離や空洞を検出する技術について解説致します。ご期待下さい。

### 参考文献

- 1) 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), pp.6, 2001.3
- 2) 魚本健人・加藤潔・広野進：コンクリート構造物の耐久性シリーズ5, コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, pp.28-42, 1990.5
- 3) 国枝泰祐・鎌田敏郎・浅野雅則・六郷恵哲：弾性波の伝播速度に着目したPCグラウトの充填評価手法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1551-1556, 2002.6
- 4) 渡海雅信・小阪浩二・大津政康：SIBIEを用いたコンクリート中の欠陥検査法に関する考案, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.499-504, 2001

- 5) 鎌田敏郎：PC 構造物のメンテナンスにおける非破壊検査，プレストレストコンクリート，Vol.45, No.1, pp.51～58, 2003
- 6) Jack Elliott, Thomas Le Diouon, Jerome Stubler: CONTINUOUS REMOTE ACOUSTIC HEALTH MONITORING OF TENSIONED ELEMENTS IN STRUCTURES, FIB Proceedings of the 1st fib Congress, Osaka, pp.101～106, Oct.2002
- 7) 森寛晃・内田昌勝・小川彰一・柴田清人・濱田譲：PC 鋼材破断により生じる弾性波のモニタリング手法，弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，土木学会コンクリート技術シリーズ，No.61, pp.307-312, 2004  
【2005年4月26日受付】



●関連書籍のご案内

・初期応力を考慮した  
RC 構造物の非線形解析法とプログラム

平成16年3月発行

田辺忠顕編著／技報堂出版刊

B5判・358頁（本体価格6,000円＋税5%）

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233