

小椋 紀彦<sup>\*1</sup>, 葛目 和宏<sup>\*2</sup>, 玉越 隆史<sup>\*3</sup>, 山本 貴士<sup>\*4</sup>, 宮川 豊章<sup>\*5</sup>

## Experimental Study on Detection of Damaged Depth by ASR Using Ultrasonic Method

Norihiro OGURA<sup>\*1</sup>, Kazuhiro KUZUME<sup>\*2</sup>, Takashi TAMAKOSHI<sup>\*3</sup>,  
Takashi YAMAMOTO<sup>\*4</sup> and Toyoaki MIYAGAWA<sup>\*5</sup>

**要旨** : ASR 劣化が顕在化したコンクリート構造物の維持管理では, 鉄筋とコンクリートの一体性をどのように評価するのが対策を検討する上で重要である. 超音波法で構造物の劣化状況を評価する試みは行われているが, 表面からの劣化深さを推定する方法は確立されていない. 本研究では, 供試体を対象に劣化深さを斜角法で推定する方法を提案するとともに, 既設橋脚梁部分に適用した結果について検討した結果を報告するものである.

**キーワード** : アルカリ骨材反応, 超音波法, 内部劣化, 斜角法, 伝播速度

### 1. はじめに

ASR 構造物の劣化は, 表面に顕著なひび割れが出ることで認識されるが, 内部のひび割れ状況の把握が, 部材の性能を評価する上で不可欠である. 超音波をコンクリートに適用した場合, 内部欠陥やひび割れの発生状況に応じて減衰する性質があることから, これを利用して ASR 部材内部の劣化状況を非破壊的に把握できる可能性がある. しかし, 部材を対称に挟む透過法では, 透過させた経路全体についての評価となるため, 欠陥位置の特定には有効なもの, 表層部からの内部劣化深さまでは評価できなかった<sup>1)</sup>.

このような背景から, 劣化深さの把握できる手法の開発を目標として, 超音波を部材の隅角部を挟んで斜めに透過させる斜角法による内部劣化評価方法を検討した.

### 2. 超音波装置の特徴

超音波装置は各種メーカーによって使用周波数帯や, 印加電圧も異なっている. その性能を評価するため, コンクリート用として入手し易い超音波装置を集め, 要因の異なる供試体に対して超音波を透過させ, 伝播速度を比較した. 表-1 に今回使用した超音波装置の仕様を示す.

筆者らが使用した超音波装置 (K 社製) は, 印加電圧 1200V, 放電時間  $0.5 \mu \text{ sec}$  である. 探触子としては, 共振周波数の異なる 3 種類 (40kHz, 80kHz, 140kHz 探触子) を用意した. E 社製の装置に付属する探触子については, ここで選定した探触子の中では共振周波数が最も低く 28kHz であった. T 社製の超音波装置については, 印加電圧が最も低い仕様であった.

表-2 に用いた供試体の一覧を示す. 健全モデルは, 普通コンクリートを用いて, 設計基準強度を  $35\text{N/mm}^2$  として配合設計した. 劣化モデル

\*1 (株)国際建設技術研究所 技術部

\*2 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長

\*3 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路構造物管理研究室 室長

\*4 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授

\*5 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授

表-1 超音波測定器の仕様

装置名	K 社			E 社	T 社
印可電圧	1200V			1000V	700V
放電時間	0.5 $\mu$ sec			不明	0.5 $\mu$ sec
探触子 共振周波数 (*実測値)	40kHz (42.0kHz)	80kHz (77.1kHz)	140kHz (147.0kHz)	28kHz (28.3kHz)	50kHz (42.5kHz)
探触子直径	60mm	35mm	20mm	20mm	40mm

※実際に探触子同士を合わせて行った実測値

表-2 供試体モデルの一覧

試験体	試験体概要	外 観
健全 モデル		
小劣化 モデル		
中劣化 モデル		
全体劣化 モデル		

※単位(mm)

では、ひび割れが発達した状態を模擬するためポラスコンクリートで劣化を模擬した。

測定結果を図-1 に示す。健全モデルでは、装置や共振周波数に関わらず、伝播速度に大差はなかったのに対し、劣化モデルでは、劣化部の占める割合が大きくなるほど、装置や共振周波数によって伝播速度に差が生じた。

小,中劣化モデルでは、T 社の装置による伝播速度が遅い傾向にあった。T 社は 3 種類の装置の中で最も印加電圧が低い。明石の研究<sup>2)</sup>によれば、発振パルスの振幅は、印加電圧に比例するため、電圧が低いと透過法の立上りが鈍くなり、伝播時間が遅く計測されるとしている。今回の計測結果においても、これらが起因して伝播速度に影響を与えたものと考えられる。

全体劣化モデルでは、K 社の 140kHz、E 社の

装置による測定結果において、伝播速度が著しく低下した。これら二つの共通点は、探触子の直径がともに 20mm と小さいことにある。探触子との接触面もポラスコンクリートであるため、表層は密着しにくい状態であった。探触子は面全体で発振・受振するため直径の小さい探触子では、その接触面の密着性による影響が生じ易いためと考えられる。

以上、超音波装置が異なれば、同じ供試体でも伝播速度の測定値が異なる傾向にあった。

また各装置とも、劣化部を透過してきた量に応じて伝播速度が低下している傾向は同様であるが、その程度は装置（探触子）によって異なっている。しかし、伝播速度に着目すれば、健全モデルと劣化モデルとを比較すれば何れも有意な差が見られており、コンクリートの品質を判断するには同一の装置を使用する限り、適用可能であると考えられる。

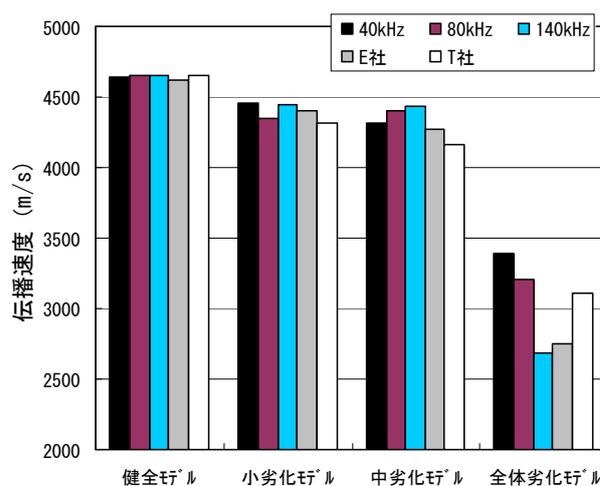


図-1 超音波伝播速度測定結果

### 3. 斜角法を用いた表面からの劣化深さの検討

#### (1) 斜角法の概要

例えば梁の断面で、図-2 に示すように、隅角

部から受・発振子を同距離で順次遠ざけていき、採取した測定データを、縦軸に伝播時間、横軸に探触子の中心間距離として整理すると、均質なコンクリートの場合、走時曲線は直線で表される(伝播時間は距離に比例)。一方、コンクリート表面に劣化部やひび割れがある場合、伝播経路が表層劣化部と内部の一般的なコンクリート部を透過するため、変曲点を持った走時曲線が得られることになる(伝播時間は距離に比例しない)。

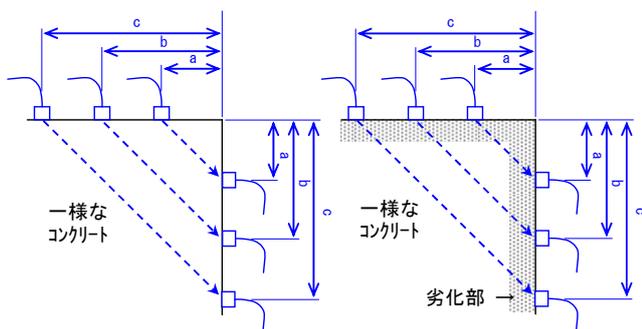


図-2 斜角法による測定イメージ

## (2) 探触子間距離の補正

斜角法や表面法では、探触子間距離の設定方法によって見かけ上の伝播速度が異なることがある。これは、探触子がある面積を持つ振動子を用いているにも関わらず、点発振・点受振として探触子の中心間距離を用いて伝播速度の算出を行っているためである。図-3 に示すように、斜角法では、中心間距離が短いほど伝播速度に与える影響は大きい。そのため斜角法では、探触子間距離に対して一定の補正を行うことが必要となる。

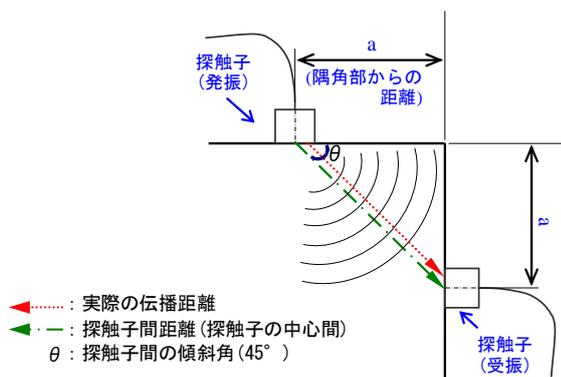


図-3 探触子間距離の補正

補正方法として、図-4 に示す実測した中心間距離と伝播時間から線形補間線を求め、線形補間線の X 切片  $d_0$  から探触子間距離を補正し、伝播速度を算出することを試みた。

得られた線形補間線の X 切片  $d_0$  は、中心間距離と実際の探触子間距離の差、および表層部と内部コンクリートとの品質から生じる伝播時間の変動量が含まれていると推察できる。

ただし、表層部が劣化したコンクリートの場合、補間する範囲で補正值が大きく影響を受ける恐れもあるため、可能な限り測定間隔の距離を短くするなどし、多くのデータを採取する必要がある。

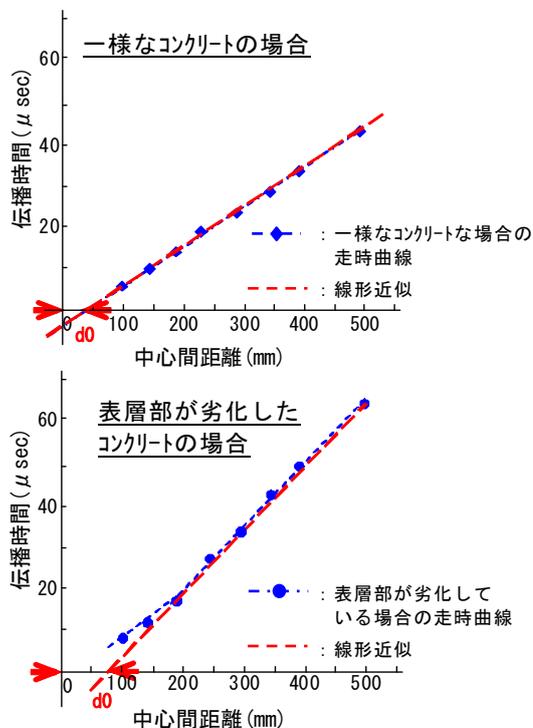


図-4 中心間距離と伝播時間の関係

## (3) 内部劣化深さの算定

表層部劣化部材では図-5 に示すように補正した探触子間距離と伝播速度の関係から、伝播速度が低下する箇所までを推定内部劣化深さと考える。補正後の探触子間距離と伝播速度との関係から、図-5 に示す変曲点までの探触子間距離を  $X_0$  とすると、推定内部劣化深さ  $l$  は、下式により定まる。

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}} \times X_0 \quad (1)$$

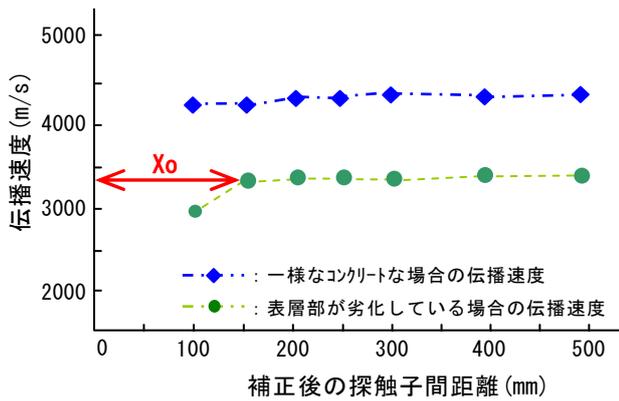


図-5 補正後の探触子間距離と伝播速度の関係

### 3.1 供試体を用いた測定結果

#### (1) 供試体の概要

健全なコンクリートでの一例として、実構造物から切り出してきた切り出しブロックを使用することとした(以下、健全供試体と記す)。このブロックは、道路計画上撤去されたもので、都市高架道路のRC橋脚の梁部である。この橋脚は、建設後40年経過したものであるが、問題となるような劣化はなかった。

また、ASRが顕在化したコンクリートとしては、反応性骨材を用いて600×600×600mmの角柱供試体を作製し、40℃、100%RHの促進環境下で約1年間促進養生させたものを使用した(以下、ASR供試体と記す)。試験時の表面ひずみの計測値は、約5000μ程度であった。

探触子(共振周波数:40kHz 使用)は、隅角部から100, 150, 200, 300, 400, 500mmと同距離で順次遠ざけていき、常に探触子の傾斜角が45°になるよう設置した。図-6は、中心間距離を補正する前の探触子間距離と伝播時間の関係を示している。健全供試体の場合、中心間距離と伝播時間との関係はほぼ直線で近似されているのに対し、ASR顕在化供試体の場合では、中心間距離141mm(隅角部からの距離100mm)の箇所に変曲点がある。

補正前、補正後の伝播速度と探触子間距離との関係を図-7に示す。補正前の探触子間距離と伝播速度との関係では、健全供試体、およびASR供試体とも、探触子間距離が短いほど伝播速度は速い傾向を示している。

健全供試体の場合、141mm(隅角部からの距離100mm)の測点では5000m/sを超えており、コンクリートの伝播速度としては大きすぎる。明らかに見かけの伝播速度を示している。一方、補正後の伝播速度では、4400m/s程度でほぼ一定で推移しており、図-6に示した中心間距離と伝播時間との関係が、比例関係にあったことから、補正方法が適切であったと考えられる。

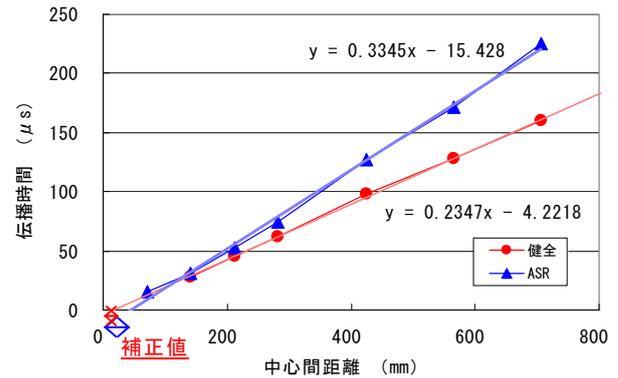


図-6 中心間距離と伝播時間の関係

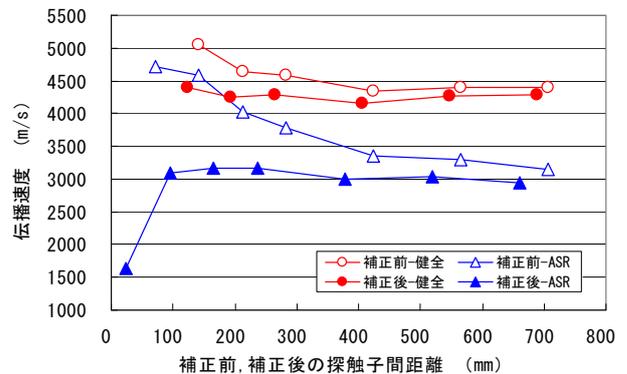


図-7 探触子間距離と伝播速度の関係

#### (2) 表層部からの内部劣化深さの検証

ASR供試体の場合では、補正後の伝播速度は、探触子間距離91mmを境として著しく伝播速度が低下している。これを、式(1)の内部劣化深さの推定式より算出すると、その深さは64mm程度であると推察された。

表層部からの内部劣化深さを検証するため、ASR供試体については、ワイヤーソーを用いて供試体の中央付近で鉛直方向に切断し、その断面でひび割れ状況の確認を行った。図-8に代表的な写真を示す。

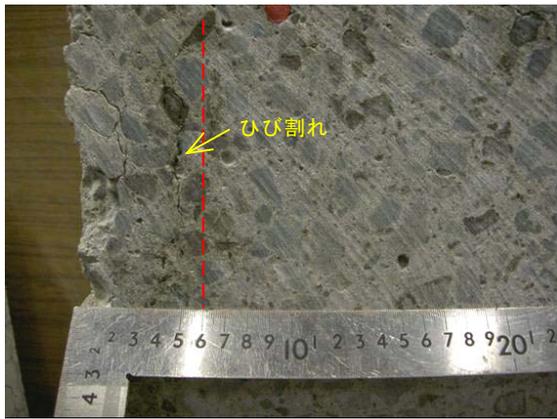


図-8 供試体の割断面

目視観察では、かぶり部(100mm)までは細かなひび割れが認められており、顕著なひび割れは表面から 60mm 程度まで進展していた。斜角法で推定した内部劣化深さの評価は、顕著なひび割れ深さとほぼ一致していたと考えられる。

### (3) 測定器および探触子による影響

メーカーの異なる超音波装置や探触子(共振周波数 80, 140kHz) を用いた場合、表層部からの内部劣化深さの評価に差が生じるかどうかについて検討を行った。測定結果を図-9 に示す。

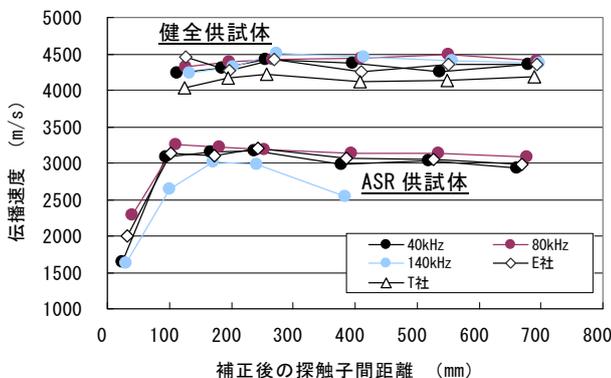


図-9 補正後の探触子間距離と伝播速度の関係

探触子の共振周波数が高い 140kHz 時の測定では、ASR 供試体に対して、探触子間距離 400mm 以上(隅角部からの距離 300mm 以上)で超音波を伝播できなかった。斜角法では、対面で透過させる測定法と比べ探触子が斜めに配置されているので、より大きなエネルギーが必要となる。共振周波数が高い探触子ではエネルギーが減衰しやすく、内部劣化深さの測定には適さないのではないかと考えられる。

印加電圧の低い T 社の装置においては、健全

供試体のみしか測定が行えなかったが、伝播速度の絶対値は遅いものの、傾向は他の測定結果とほぼ同じであった。印加電圧は高い方が望ましいと思われるが、メーカーの異なる超音波装置においても、斜角法の適用は不可能ではないと考えられる。

## 3.2 実橋での測定結果

### (1) 実橋の概要

斜角法を実構造物を対象とした場合の、その適用性、および精度等について検討を行った。

対象とした構造物は、外観上 ASR が顕在化している RC 構造の道路橋脚 2 基で、ASR 劣化の進行が目視で確認できるが、測定時点では表面保護工など施していない未対策の構造物(経過観察中)であった。

測定はひび割れが顕在化している梁部分を対象に行った。梁上側隅角部、または梁下側隅角部、梁端部隅角部を対象に実施した。表-3 に示すように M 橋は N 橋と比較すると、外観上のひび割れは軽微であった。

表-3 対象構造物の概要

橋梁名	対象橋脚	外観状況	測定箇所
M 橋	P1	梁部分に 0.2 ~ 0.3mm 程度のひび割れが発生.	梁上側隅角部(天端), 梁端部隅角部(端面)
N 橋	P6	雨がかりのある部分に幅 0.5mm 以上のひび割れや白い滲出物が生じている.	梁上側隅角部(天端), 不陸あり 梁下側隅角部(梁下面), 断面修復あり 梁端部隅角部(端面)

### (2) 表層部からの内部劣化深さの測定結果

測点は、隅角部から 100-100mm を探触子設置の最短距離とし、300-300mm までは 50mm 間隔、400, 500mm は 100mm 間隔とした。なお、測定においては不陸の影響を無くするため、全ての測定位置でケレンを行ってから実施した。

これらの 2 橋で実測した補正後の探触子間距

離と伝播速度との関係を図-10 示す。測定値の中で N 橋の天端、および下面の位置では、変曲点が多数見られており、伝播速度の低下位置を特定することは困難である。内部劣化度評価を行う斜角法の測定では、伝播距離が短いこともあり、特に浮きや大きなひび割れ、不陸が生じている箇所ではその影響を受けやすい。そのため、これらの影響が生じていない箇所、ここでは端部の測定結果から内部劣化深さを推察することとした。

M 橋および N 橋の端部隅角部の伝播速度の低下位置から、推定した内部劣化深さは、式(1)より、図-10 に示す  $X_0$  から、M 橋では 75mm 程度、N 橋では 125mm 程度であると推察された。

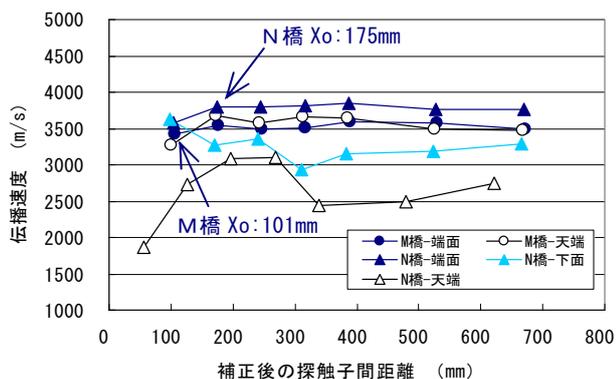


図-10 探触子間距離と伝播速度の関係

### (3) コア採取による内部劣化深さの検証

M 橋、N 橋とも内部劣化深さについて検証するため、測定位置からコアを採取し、その外観を観察した。図-11 に N 橋でのコアのひび割れ状況を示す。表面側から 110mm 程度まで、顕著なひび割れが観察されているが、その奥側からはひび割れは認められなかった。また、M 橋でのコアによるひび割れ深さは 60mm であった。



図-11 採取コアのひび割れ状況

これらの 2 橋と、供試体での斜角法による推定値とひび割れ深さ実測値との関係は、図-12 のように示される。

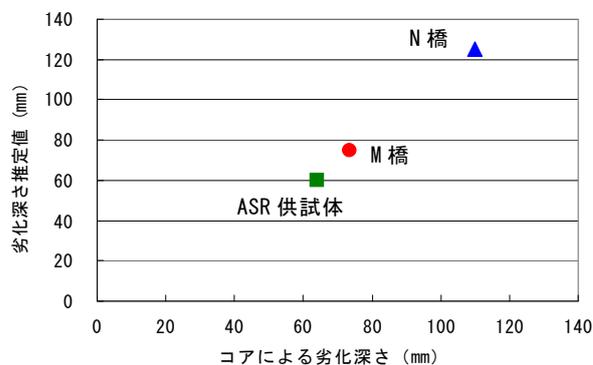


図-12 劣化深さ推定値と実測値との関係

以上の結果から、斜角法による構造物の劣化深さ推定値は、実例値の 0.94~1.14 倍の範囲内にあることが分かった。

## 4. まとめ

- (1) 超音波斜角法を用いれば、一様なコンクリート部と劣化部を経路してきた場合とでは、定性的に差別化できるため、その有意差を利用すれば、幾何学的に劣化範囲を推定できる。
- (2) 超音波装置や探触子が異なれば、その物理的特性により異なるが、コンクリートの健全部と劣化部とを判断するには同一の装置を使用する限り、適用可能である。

## 謝辞

本研究は「ASR 劣化構造物安全性評価手法の研究 (研究代表者: 宮川豊章)」における研究成果の一部を紹介したものであり、関係各位に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 葛目和宏, 森雅司, 松本茂: アルカリ骨材反応を生じた構造物に適用する非破壊検査, コンクリート構造物のアップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp.171-178, 2002
- 2) 明石外世樹: コンクリートの非破壊試験に関する研究, 土木学会論文集, No.390/V-8, pp. 1-22, 1988. 2