

論文 超音波を用いたコンクリート系構造物の内部探知手法に関する研究

山川 信人^{*1}・安達 洋^{*2}・中西 三和^{*2}・廣瀬 正行^{*3}

要旨: 本研究は、コンクリート内部探知用に開発された超音波装置を利用して、コンクリート系構造物における鉄筋位置、ひび割れ深さ及び埋設管の内部探知を実施可能な操作手法を確立することを目的とする。ここでは、これら探知目標物をあらかじめ所定の位置に配置した供試体を対象に、超音波の発信と受信操作(探触子操作)を試行錯誤することにより、各探知目標物を適切に探知するための探触子操作法を明らかにしたものである。

キーワード: 超音波、内部探知、非破壊検査、コンクリート、鉄筋、ひび割れ、埋設管

1. はじめに

鉄筋コンクリート建造物の耐久性評価や耐震改修等を行うときに、建物を傷めずに調査・診断する非破壊検査法が注目されている。しかし、超音波を用いてコンクリートの内部探知を行う場合、従来、コンクリート特有の問題点¹⁾により、内部探知を困難にしていた。本研究はこの問題点を解決しコンクリート内部探知用に開発した超音波装置を用いて、種々の探触子走査を行うことにより、コンクリート系構造物内部の探知対象物の位置を正確に捉えることを目的とする。鉄筋かぶり厚、ひび割れ、埋設管(鉄管・塩ビ管)を探知対象物として検討した。

2. 超音波内部探知装置

2.1 探知理論

従来法により鉄などの均質材料を内部探知する場合は、1つの傷で反射した波を受信する。しかし、コンクリートの場合には、この傷が骨材や空隙に当たり、反射波が多数存在することとなる。本装置はこれらを探知目標とせず、除去・低減する

ものであり、巨視的探知理論と名づけている²⁾。

受信波には、探知目標物から発信された波(以後、目標波)以外にも、骨材や空隙で反射する散乱波や表面波、直接波、外乱といった目標波を見失わせてしまう波(以後、妨害波)が含まれる。本装置の大きな特徴は、加算平均化処理機能を装備し、これら妨害波を除去・低減させることである。すなわち、発・受信子(探触子)を移動させながら連続して超音波を発信し、受信波を加算平均することにより、位相差を利用し、妨害波を除去・低減するものである。版厚測定を例とした加算平均化処理の概念を図-1に示す。この処理を1,000~20,000回行うことにより、妨害波が除去・低減される。

2.2 探知原理

図-2にひび割れ深さ探知の概念を示す。発

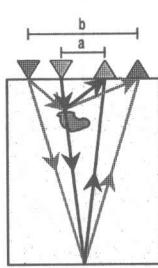


図-1 加算平均化処理の概念

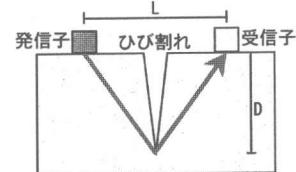


図-2 探知原理概念

*1 社会福祉法人 岩手愛児会 工修(正会員)

*2 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博(正会員)

*3 (株)エッチアンドビーシステム 代表取締役社長

信子から発信された超音波がひび割れ底部を回折して受信子に到達するまでの伝播時間(T)と、超音波伝播速度(V)から、式(1)によりひび割れ深さを計測する。

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{V^2 T^2 - (L - \phi)^2} \quad (1)$$

$$\left[\begin{array}{l} D : \text{ひび割れ深さ} \quad V : \text{超音波伝播速度} \\ T : \text{伝播時間} \quad L : \text{探触子間距離} \quad \phi : \text{探触子径} \end{array} \right]$$

本装置の発信超音波は、セラミック振動子に従来と異なるステップ関数型電圧を積荷し、低周波も評価可能な広帯域超音波を発信している。広帯域超音波を発信した場合、受信波も広帯域超音波となるが、本装置は広帯域受信超音波にフィルタリングを施すことにより、任意の周波数で受信波を取得可能にしている(以後、掃引処理)。妨害波が小さく、目標波が大きく励起する周波数は理論的に式(2)より求められ(以降、最適周波数)^{3),4)}、掃引処理により最適周波数を中心周波数とする狭帯域成分波として受信波を取り出す。

$$f_0 = \alpha \times \frac{1}{2} \times \frac{V}{\frac{1}{2}(a_2 - a_1 + \phi)} \quad (2)$$

$$\left[\begin{array}{l} a_1 : \text{探触子間距離最小値}, \quad a_2 : \text{探触子間距離最大値} \\ \phi : \text{探触子径}, \quad V : \text{超音波伝播速度}, \quad \alpha : \text{補正值} \end{array} \right]$$

2.3 波形分析ソフトウェア

受信波を分析する際に使用される主なソフトウェアは Non Standard2, T.G.C, Emphasis 等がある。Non Standard2 とは、多点で計測した場合、各計測点の中で最も振幅の大きな波を最大値で規準化し、それに併せて他の振幅の大きさを決定し、表示させるものである。T.G.C には、T.G.C0 ~T.G.C4 の 5 種類あり、

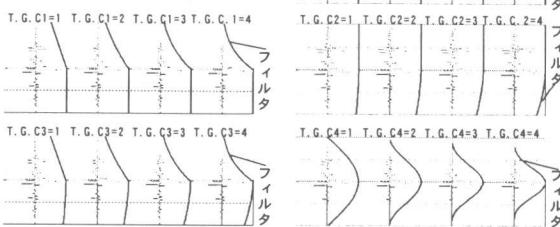


図-3 T.G.C 概念

目的に沿って図-3 のように時系列にフィルタリングを施し、波形を編集するものである。

「T.G.C0=」に続く数字が大きくなるに従い、フィルタリング効果が大きくなる。他の T.G.C も同様である。Emphasis とは、受信波を 2,3,4 乗し、大きな波は更に大きく、小さな波は更に小さくする。

3. 鉄筋かぶり厚探知

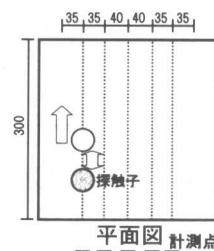
3.1 供試体概要

かぶり厚の異なる 2 体の供試体を図-4, 5 に示す。A 供試体は D19 の鉄筋を上下面よりかぶり厚 50mm で計 4 本、B 供試体は $\phi 19$ の鉄筋を上面よりかぶり厚 100mm で 1 本配筋している。供試体コンクリートの超音波伝播速度は透過法で計測した結果、A 供試体は 4388.0m/sec、B 供試体は 4298.8m/sec であった。

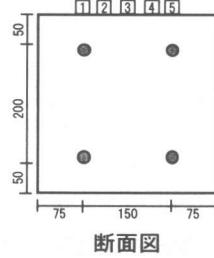
3.2 探知手法

探触子間距離を 60mm 一定、60~70mm、60~80mm、60~90mm の場合にわけて、鉄筋と同一方向に移動させて計測を行った。計測点は図-4, 5 のように 35~40mm 間隔で 5 つ設けた。

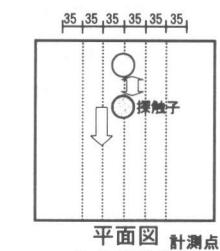
鉄筋だけでなく版厚も同時に探知する場合、鉄筋が確認可能な周波数帯と版厚も同時に確認可能な周波数帯は同様の周波数帯であり、この周波数帯内で T.G.C3=3,4 で使用することによっ



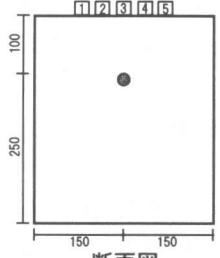
平面図 計測点
1 2 3 4 5



平面図 計測点
1 2 3 4 5



断面図 計測点
1 2 3 4 5



断面図 計測点
1 2 3 4 5

て良好な波形が得られることから、鉄筋と版厚を同時に探知する場合は式(2)の最適周波数を中心周波数とする狭帯域成分波で取り出す。

3.3 計測結果

計測結果の一例を図-6, 7に示す。底部に一样に発生している波が版厚の反射波である。A供試体は計測点1, 5, B供試体は計測点3が鉄筋経路波である。A供試体は鉄筋かぶり厚=49mm, 版厚=305mm, B供試体は鉄筋かぶり厚=102mm, 版厚=355mmという高精度の計測結果を得た。

図中点線で囲まれた波は、2, 4計測点から斜めに入射した上面鉄筋の反射波であり、探触子間距離が広がるに従い、この反射波の振幅が大きくなる傾向にある。

4. ひび割れ探知

4.1 内部で深さが変化する場合の評価方法

(1) 供試体概要

ひび割れ深さが変化する垂直ひび割れを4本模擬した無筋コンクリート供試体を図-8に示す。それぞれを①, ②, ③, ④ひび割れとし、本節では②ひび割れの評価結果を示す。C供試体コンクリートの超音波伝播速度は透過法で計測した結果、4372.5m/secであった。

(2) 評価方法

ひび割れを介して探触子を配置し、最初に受信された波がひび割れ底部の回折波である。しかし、内部で深さが変化する場合、超音波はコンクリート内部で扇状に広がるという特性のため、計測点直下のひび割れ回折波より、斜めに入力されたひび割れ回折波が先に受信されてしまう(図-9)。そのため、ひび割れ形状を知るために多点で計測した場合、図-10のように計測値を半径とした円を描き、それらの包絡線によって評価する。

(3) 評価結果

無筋コンクリートの場合、鉄筋経路波が存在しないため、探触子を移動させずに計測する(以降、基本計測)。更に、斜めに入力された超音波

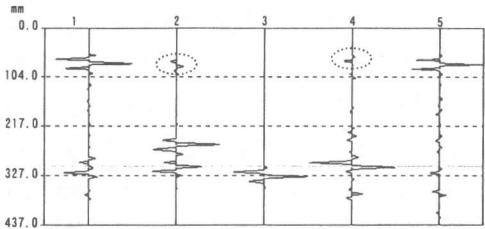


図-6 A供試体計測結果 [探触子間距離 60~70mm, Non Standard2, Emphasis=3, T.G.C3=3(版厚位置)]

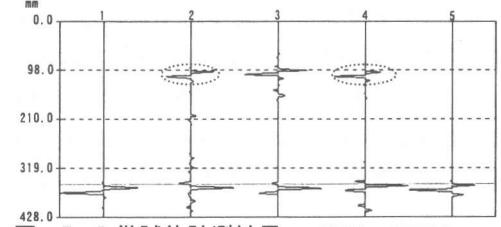


図-7 B供試体計測結果 [探触子間距離 60~80mm, Non Standard2, Emphasis=3, T.G.C3=3(版厚位置)]

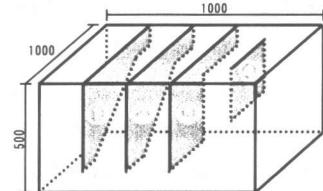


図-8 C供試体

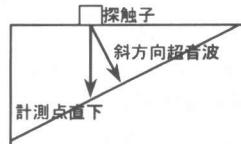


図-9 斜方向超音波

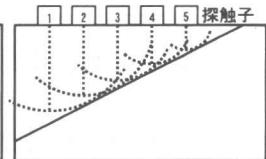


図-10 評価法

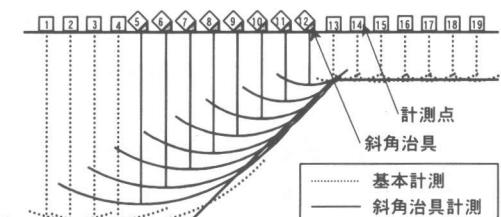


図-11 ②ひび割れ最終評価結果

は強度が減少するため、深さが変化する部分について、斜方向に入力可能な斜角治具を用いて計測する(以降、斜角治具計測)。基本計測と斜角治具計測を組み合せた②ひび割れの最終評価結果を図-11に示す。誤差が少なく高精度にひび割れ形状を確認できる。

4.2 ひび割れ深さ計測

ひび割れが鉄筋位置より深く進展している場

合、ひび割れを介して探触子を配置すると、理論上、図-12 のようにひび割れ底部の回折波の他に鉄筋経路波が発生し、鉄筋経路波が先に受信されてしまう。しかし、図-13 のように、ひび割れに沿って受信子と発信子を逆方向に移動させる走査法を行うことにより、鉄筋経路波を除去し、ひび割れ底部の回折波の起生位置を特定することができる⁵⁾。この走査法における最適な探触子間距離 a_1 , a_2 は、鉄筋かぶり厚やひび割れ深さで異なってしまうため、本節で提案する探知手法は、種々のひび割れ深さに対し最適な探触子間距離 a_1 , a_2 を導く探知手法のことである。

(1) 供試体概要

供試体を図-14 に示す。 $\phi 19$ の鉄筋をピッチ 150mm, かぶり厚 50mm で上下面に計 6 本配筋し、深さ 100, 150, 200mm のひび割れを幅 2mm で模擬している。D 供試体コンクリートの超音波伝播速度は 4300m/sec であった。

(2) 探知手法

1つの計測点について 4 回程度の計測を行う。1 回目は探触子間距離 a_1 と a_2 を同じ値として計測する。2, 3, 4 回目は探触子間距離 a_1 を 1 回目と同じ値にし、探触子間距離 a_2 を徐々に大きくして計測する。これにより、鉄筋直上で計測した場合、1 回目では鉄筋経路波が大きく起生し、2, 3, 4 回目では徐々に鉄筋経路波が減少し、後方に起生するひび割れ底部の回折波が明敏となる。最初に受信された鉄筋経路波が減少され、その後に起生するひび割れ底部の回折波が最も顕著に識別可能な状態を最適な探触子間距離とする。探触子間距離 a_1 は、実験から深さ 200mm のひび割れまでは 70~100mm の範囲で設定することにより、ひび割れ底部の回折波が除去されずに探知できる。

(3) 計測結果

計測 1 回目の探触子間距離を $a_1=80\text{mm}$, $a_2=80\text{mm}$, 2 回目を $a_1=80\text{mm}$, $a_2=100\text{mm}$, 3 回目を $a_1=80\text{mm}$, $a_2=120\text{mm}$, 4 回目を $a_1=80\text{mm}$, $a_2=144\text{mm}$ として 1000 回の加算平均化処理を行い計測した。

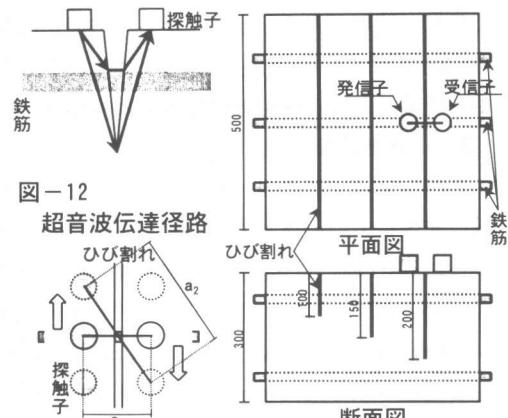


図-12 超音波伝達径路
図-13 探触子走査法

図-14 D 供試体

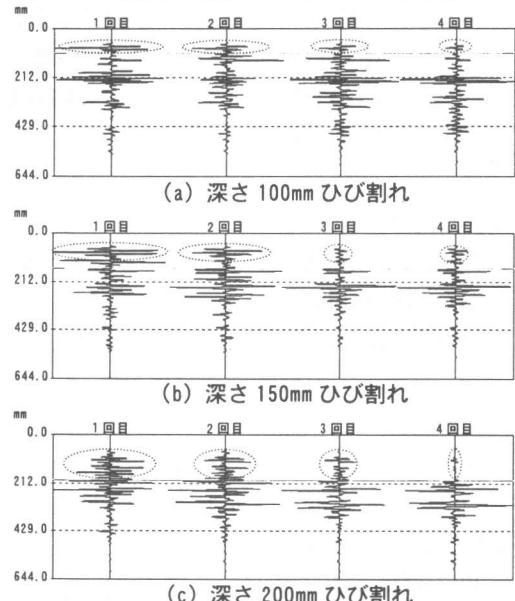


図-15 ひび割れ深さ計測結果
[Non Standard2, Emphasis=2, T.G.C2=3(鉄筋位置)]

計測結果を図-15 に示す。探触子間距離毎の最適周波数を平均した値を中心周波数とする狭帯域成分波として取り出している。点線で囲まれたところが鉄筋経路波であり、すべてのひび割れにおいて 1 回目に大きく励起した鉄筋経路波が徐々に減少されていることがわかる。その後に起生する振幅の大きな波がひび割れ底部の回折波である。深さ 100mm のひび割れは、4 回目の探触子間距離では鉄筋経路波と共にひび割れ底部の回折波の振幅も減少してしまい、3 回目が最適な探触子間距離と言える。深さ 150mm のひび割れは 3, 4 回目、深さ 200mm のひび割れ

は4回目が最適な探触子間距離と言える。(a)=103mm, (b)=152mm, (c)=199mmという高精度の計測結果を得た。

5. 埋設管探知

鉄筋コンクリート建造物の増改築や耐震改修等を行う場合、壁やスラブからコンクリート強度試験用にコアを抜く必要が生ずる。壁やスラブには鉄筋の他に設備管が埋設されており、これらを傷つけずにコアを抜くためには埋設管の位置を知る必要がある。

5.1 供試体概要

壁やスラブを想定した供試体を図-16に示す。図中に計測点番号も合わせて示している。D10の鉄筋をピッチ200mm, かぶり厚30, 40mmで格子状に配筋し、径28.6mmの鉄管と径28mmの塩ビ管を埋設している。鉄筋直下の鉄管はかぶり厚85.7mm, 斜めの鉄管はかぶり厚71.4mm, 塩ビ管はかぶり厚100.0mmである。E供試体コンクリートの超音波伝播速度は透過法で計測した結果、4425.7m/secであった。

5.2 探知手法と計測結果

埋設管を探知する場合は、以下の手順で行う。手順毎に探知手法と計測結果を示す。手順①～③がおおまかな埋設管位置の探知手法、手順④～⑥が詳細な埋設管位置の探知手法である。

[手順①] 3章で示した鉄筋探知と同様の計測法を供試体全体に適用し、計測された鉄筋に沿って図-16のように計測点番号をつけ、ブロック分けをする(以降、計測点ブロック)。この際、探触子の走査範囲を短く設定すると、埋設管の反射波と鉄筋の反射波が区別できないことがあるため、走査範囲を600mm程度にして計測する。

[手順②] ブロック内で探触子をランダムに走査しながら1000回の加算平均化処理を行い、得られた受信波にHigh-Power Detection手法(以降、H.P.D手法)を適用する。この際、探触子間距離を60～70mmの間で変化させる。

H.P.D手法とは、有意な波形のみを加算平均化処理する手法である。有意な波形とは、ある

指定した時刻±10μsecの範囲の中で、最大の振幅に対し、指定した割合以上の振幅を持つ波と定義する。このときの指定した時刻(以降、指定時刻)は、カーソル移動により任意に変更可能であり、最大振幅に対する割合(以降、指定振幅)は、0%～100%まで任意に変更可能である。0%の波を加算平均するということは全ての波を加算平均することになる。

本手法は壁やスラブに埋設された管を探知対象としているため、版厚の中心付近に埋設管が存在していると仮定し、指定時刻を版厚の中心付近に相当する時刻、更に、数回の思考錯誤により指定振幅を80%と設定し、これら条件を満たすものを有意な波形としてH.P.D手法を適用した。計測結果を図-17に示す。図中の計測点番号は図-16の計測点番号に対応している。上面より1/2付近に一様に発生している波が版厚の反射波である。埋設管が1本存在する計測点3, 7, 12, 16に埋設管を確認できる。

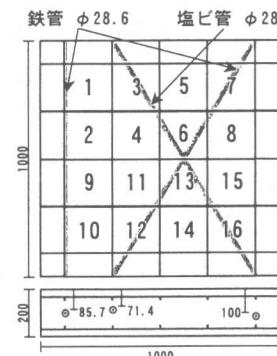


図-16 E供試体

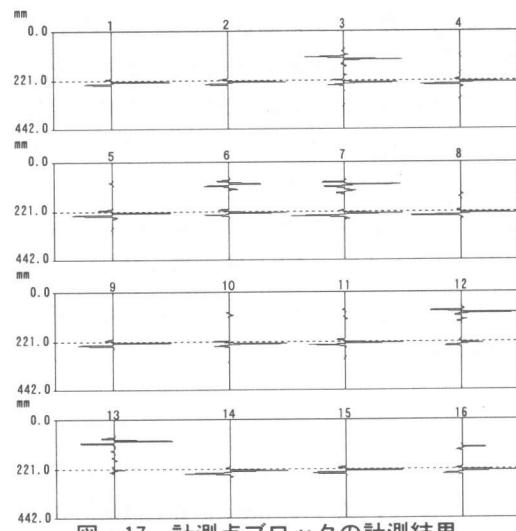


図-17 計測点ブロックの計測結果
(Non Standard2, Emphasis=3, T.G.C1=3(版厚の中心位置))

埋設管が2本存在する計測点6, 13は、H.P.D効果が $\pm 10\mu\text{sec}$ と狭く、反射波の最初に起生する振幅が小さいため、2本の埋設管を同時に探知することが困難である。しかし、H.P.Dの指定時刻を変化させ波形を読み取ることにより、2本の埋設管を確認できる。

埋設管が計測点ブロック端部に存在するような計測点4, 8, 11, 15及び埋設管が鉄筋直下に存在する計測点1, 2, 9, 10では、埋設管からの反射波強度が小さくなり、再現性が悪く、評価が難しい。

埋設管が探知された計測点ブロックの計測値(かぶり厚)を表-1にまとめた。波形等から鉄管と塩ビ管を判別することはできないが、かぶり厚の違いから2種類の埋設管が埋設されていることがわかる。

[手順③] 表-1により得られた埋設管種類毎に、図-18のように計測点ブロックをマーキングし、埋設管の配置方向を確認する。コア抜きを行う場合は、探知された計測点ブロックだけでなく、その付近の計測点ブロックも避けるようとする。

[手順④] マーキングされた計測点ブロックの中心点の線形近似曲線(最小2乗法)を描き、その直線と平行に図-19のように40mm間隔程度で新たな計測点(以降、計測点ライン)を設ける。

[手順⑤] 図-19の計測点ラインに沿って、計測点ブロック内で鉄筋探知と同様の計測法を行う。探触子が計測点ブロック内から外れ、走査できないような計測点ラインでは、鉄筋の影響が大きいため、計測対象から除く。

[手順⑥] 手順⑤の結果、埋設管が探知された計測点ラインをマーキングし、図-20に示す。このようにマーキングされた計測点ラインから詳細な埋設管位置を確認できる。

6.まとめ

コンクリート内部探知用に開発された超音波装置を用いて、種々の探触子走査を探知対象物の存在が既知となっている供試体に適用した結

表-1 計測点ブロックの計測値

計測点ブロック	計測値(かぶり厚)		埋設管の種類
3	98mm		かぶり厚100mm
6	69mm	104mm	かぶり厚70mm, 100mm
7	76mm		かぶり厚70mm
12	71mm		かぶり厚70mm
13	69mm	104mm	かぶり厚70mm, 100mm
16	104mm		かぶり厚100mm



(a)かぶり厚70mmを探知 (b)かぶり厚100mmを探知

図-18 埋設管の配置方向

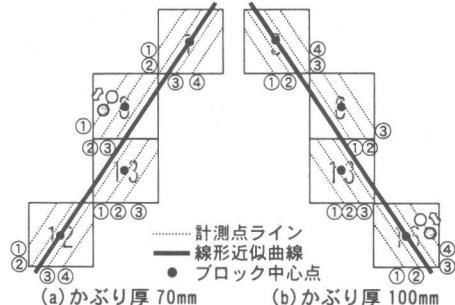


図-19 詳細計測の計測点ライン

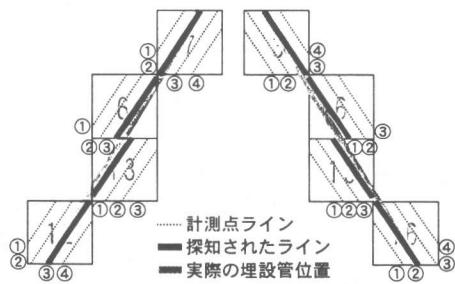


図-20 詳細計測評価結果

果、鉄筋かぶり厚、ひび割れ、埋設管の位置を精度良く捉えることができた。

[謝辞] 本研究を行うに当たり、ひび割れ深さ探知の供試体を提供して頂いた東京電設サービス㈱野崎正信氏、藤倉エネシス㈱林正雄氏に深く感謝致します。

[参考文献] 1) 廣瀬正行、宇田川義夫：超音波によるコンクリートの内部探知①、検査技術、第4巻第5号、pp.48~55、1999.5 2) 廣瀬正行、宇田川義夫：超音波によるコンクリートの内部探知②、検査技術、第4巻第6号、pp.50~56、1999.6 3) 廣瀬正行、史杰平：超音波によるコンクリートの内部探知③、検査技術、第4巻第7号、pp.47~56、1999.7 4) 廣瀬正行、周利：超音波によるコンクリートの内部探知④、検査技術、第4巻第8号、pp.54~60、1999.85) 周利ほか：巨視的探知理論を用いた超音波法によるコンクリートの内部探知(その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、pp.837-838、2000.9