

# 報告 超音波アレイセンサ（横波）を用いたコンクリートの非破壊試験法に関する検証

新井 佑一郎<sup>\*1</sup>・坂本 浩之<sup>\*2</sup>・三上 創史<sup>\*2</sup>・牛島 栄<sup>\*3</sup>

**要旨：**コンクリート構造物の調査は、超音波や電磁波等を用いた内部状態の調査と、衝撃弾性波法やコア採取によるコンクリート強度調査を並行して行うため手間がかかる。本論では、超音波アレイセンサ（横波）を用いて、若材齢コンクリートで製作された RC 模擬試験体内部の配筋や内部空隙の状態検知と同時に、横波伝播速度  $V_s$  からコンクリート強度を調査する方法を検証する。また、衝撃弾性波法（表面 2 点法）を用いた縦波伝播速度  $V_p$  とコンクリート強度の関係、 $V_s$  と  $V_p$  の関係を検証する。検証の結果、超音波アレイセンサ（横波）を用いた内部状態の検出精度は良好で、 $V_s$ 、 $V_p$  の関係も理論値とよく対応することを確認した。

**キーワード：**非破壊試験法、超音波アレイセンサ、超音波トモグラフィ、横波伝播速度、縦波伝播速度

## 1. はじめに

コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、構造物が現段階でどの程度劣化しているかを調査し、補修や更新のための計画を立てなくてはならない。そのため、コンクリート構造物の維持管理に関する需要は増大し、調査・診断技術の進化も求められている。

コンクリート構造物の調査・診断で求められる項目は、コンクリート強度、ひび割れ、内部の空隙、鉄筋の配筋状況と腐食状況など多岐にわたる。そのため、調査・診断業務は各項目に対応するための多数の工程が必要となり、人手、費用、調査時間の面で課題も多い。また、コンクリート構造物の内部状況を調査することは容易ではなく、調査技術者の技量によるところもあり、安定した結果を得ることが難しいという側面もある。さらに、調査後もコンクリート構造物を継続して利用するためには、コア抜きなどの破壊を伴う調査を最小限にとどめ、超音波や電磁波を用いた非破壊調査を用いる必要がある。

音波を用いた非破壊調査の例として、縦波の超音波を用いた探査手法がある。これは、コンクリート構造物に超音波縦波を入力し、波の反射を検出することによってジャンカ・空隙等の施工不良や配筋状況、ひび割れ深さを調査する手法である。また、 $V_p$  速度はコンクリートの強度や緻密性の影響を受けるため、コンクリート強度推定も可能である。ただし、超音波縦波は減衰が大きいいため、コンクリート構造物の比較的浅い部分しか計測できないというデメリットがある。

そこで本論では、既往の文献<sup>1)</sup>で示された横波伝播速度  $V_s$  を用いた調査・診断方法の提案と検証を行う。 $V_s$  を用いた評価手法は、超音波の減衰が  $V_p$  と比較して少

ないため、深い部分まで調査が可能であり、主に深部での検出精度向上と計測点数削減による省力化が可能となる。しかし、横波を用いた調査診断事例は少ない。特に、横波伝播速度  $V_s$  とコンクリート強度の関係についての知見は乏しい。本論では、若材齢コンクリートを用い、刻々と物性が変化するコンクリートの  $V_p$  と  $V_s$  を計測し、比較した。その結果から、 $V_s$  を用いた評価の信頼性を高めるための基礎データを得ることにした。

## 2. 超音波を用いたコンクリート構造物の非破壊調査について

### 2.1 コンクリート非破壊調査手法の比較<sup>1)</sup>

コンクリート構造物の検査・点検には、表-1 に示すような項目に対する非破壊試験法が挙げられる。本論で用いる超音波トモグラフィは弾性波法の超音波に分類される。それぞれの試験法は、検査・点検項目に対する目的や適用性に違いがある。

例えば、配筋状態とかぶり厚さに関して、衝撃弾性波と打音による方法は適用できない。また、電磁波による方法では、鉄筋の上筋の配筋状態とかぶり厚さ 0.1~0.2m 範囲の適用は可能であるが、多段配筋された部材では、上筋によって電磁波が遮られるため適さない。一方、本研究で用いる超音波トモグラフィは、48 個のアレイセンサを用いた横波による測定・解析技術によって、かぶり（厚さ）が 200mm を超え、下筋のある多段配筋においても適用が可能であり、適用可能深さは、配筋状態等の影響を受けるものの 2.0m と深い。そのため、基礎や柱梁などの大型部材の調査・診断の省力化が可能である。

\*1 青木あすなる建設（株） 技術研究所 建築研究室 博士（工学） （正会員）

\*2 （株）地球システム科学 開発事業部

\*3 青木あすなる建設（株） 執行役員 技術研究所所長 博士（工学） （フェロー会員）

表-1 コンクリート構造物の検査・点検項目と非破壊試験方法<sup>2,3)</sup>

分類	検査・点検項目	非破壊試験法						
		弾性波				電磁波		
		超音波		衝撃弾性波	打音	電磁波レーダー	電磁誘導	
		超音波トモグラフィ	超音波					
使用周波数帯域	横波 25kHz ~85kHz	2MHz ~5MHz	80Hz ~35kHz	20Hz ~20kHz	1600MHz ~600MHz	20kHz ~40kHz		
適用可能深さ	2.0m	1m	2.5m	0.3m	0.2m	0.1m		
概観	施工不良(ジャンカ、コールドジョイント)	○	○	○	○	○	○	
検査	配筋状態	○ 多段配筋可				○	○	
	かぶり厚さ	○ 多段配筋可				○ 上筋可	○ 上筋可	
	コンクリート品質	強度	○	○	○			
		緻密性	○*	○	○			
部材厚さ・内部欠陥(空洞、配管)	○	○	○	○	○			
点検	ひび割れ・はくり	○	○	○	○			

\* 超音波伝搬速度(横波)の大小による表層の緻密性評価が可能。  
出典 大成出版社「非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル」により作成

## 2.2 超音波トモグラフィの特徴

本研究で用いるシステムは、超音波横波を用いた反射法による原理を用いたものである。装置本体の下面を写真-1に示す。下面には48個(4行×12列)のアレイセンサが配置されている。測定方法は、装置下面をコンクリート表面に直接押し当て測定ボタンを押して行う。図-1に装置の測定原理を示す。最初にCH1から超音波横波が発振され、反射波がCH2~12で受振される。次にCH2から発振されCH3~12で受振される。順次、発受振を繰り返し66通り(11+10+...+2+1)、1056経路(66×4×4)の反射波信号を受振する。アレイセンサから発振された超音波横波は、音響インピーダンスが異なる面、例えば鉄筋、配管、空洞、ジャンカ、はく離、ひび割れ、躯体端面で反射する。

装置のアレイセンサ配置状況を写真-1に、被調査対象物に装置から伝搬する超音波のイメージを図-1に示す。1056経路の超音波の発受振を瞬時にやり、検知した反射波の時間と設定された横波伝搬速度から試験装置の解析ソフトによって、2次元トモグラフィ画像として、試験装置の画面に表示される。超音波トモグラフィ装置は主に配筋状態、かぶり厚さや部材厚さ・内部欠陥(ジャンカ、コールドジョイント、空洞、配管等)を検知することができる。装置には超音波の横波を発受振できるアレイセンサを48個(4行×12列)備えており、これをコンクリート表面に直接押し当て測定する。測定と解析を数秒で行い、現場で即時に解析結果を本体画面に2次元トモグラフィ画像として可視化し、表示・保存することができる。また、ラップしてデータを補足した複数の2次元トモグラフィデータから3次元トモグラフィ画像を生成することも可能であることから、コンクリート内部の状態を立体的に可視化して表示することができる。

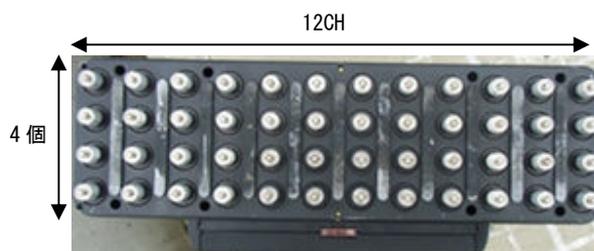


写真-1 アレイセンサの配置状況

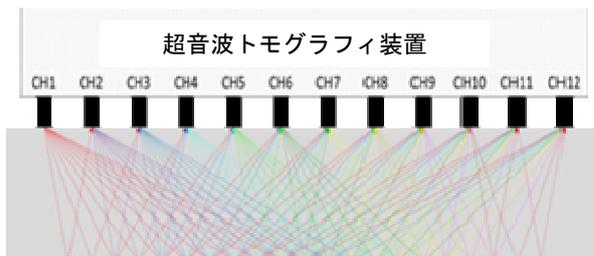


図-1 超音波伝搬のイメージ

以上のように、自動化された調査装置も実用化されており、超音波横波を用いた調査・診断手法を現場に導入することは容易である。

## 2.3 超音波トモグラフィを用いた探査の例

トンネル覆工を模擬した試験体を用いて行った超音波トモグラフィの調査の例を示す。本検討は、超音波トモグラフィの調査精度の予備的な確認が目的であるため、被調査対象のトンネル覆工の鉄筋径および配筋、覆工厚さは既知である。なお、試験体はトンネルを模擬し、地上に設置されたものなので、覆工部は地盤と接していない。模擬試験体の形状および探査位置を図-2に示す。

超音波トモグラフィ装置から出力された解析結果を図-3に示す。調査条件は、超音波周波数は50kHzである。計測された横波伝搬速度Vsは2510m/sであった。

解析結果より、覆工表面から概ね150mmの位置に250mmピッチで配置された太さ16mmの鉄筋とみられる反応が確認できた。また、覆工コンクリート背面厚さ400mmからの反射波が明瞭に検知できた。以上の結果は試験体の配筋および寸法条件とほぼ一致する。また、背面反射の2往復反射波が800mm深度(覆工厚さ×2)に検知された。背面が気中にある場合、波のエネルギー減衰および、反射した波の伝搬経路上に鉄筋による反射・遮断が少なくなるため、多重反射が生じたと考えられることができる。

ここで、通常のトンネルでは背面が地山と密接もしくはグラウト注入されているため、波のエネルギーが地盤側に透過することで減衰し、多重反射が生じにくくなると考えられる。つまり、多重反射の有無に着目することで背面空洞の状態を把握できる可能性があることが示唆された。これも、深い位置まで探査可能という、超音波横波を用いた調査・診断の利点といえる。

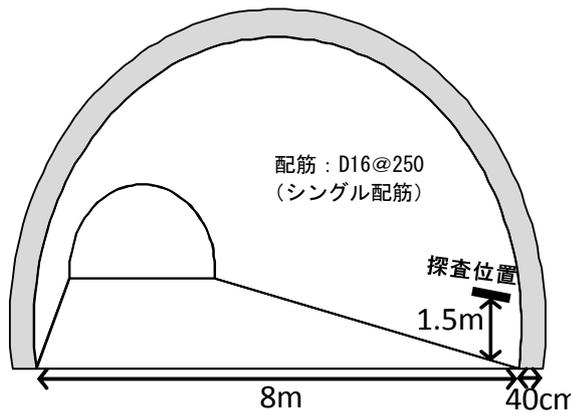


図-2 トンネル覆工試験体のイメージ

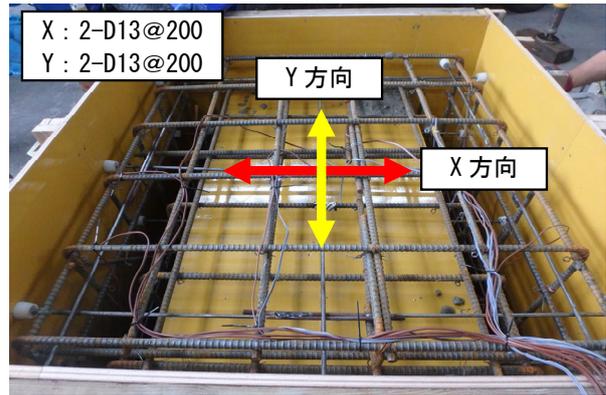


写真-2 スラブモデルの配筋写真と計測位置

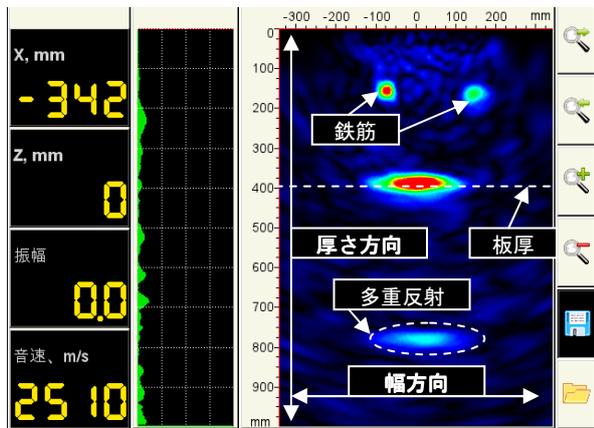


図-3 装置から出力された解析結果

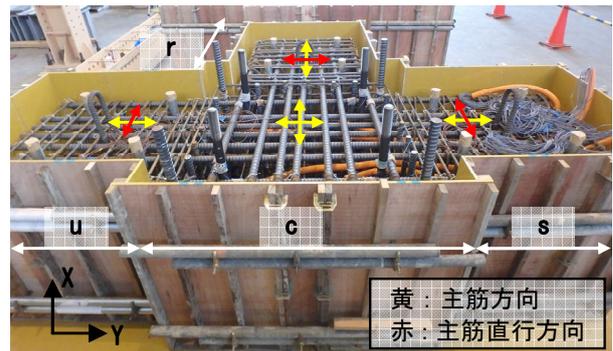


写真-3 基礎梁モデルの配筋写真と計測位置

表-2 基礎梁モデルの配筋

領域名	主筋	スターラップ	上面かぶり
u, s	7-D32	D13@100	11.5cm
r	7-D35	D16@100	8cm
c	7-D35, 7-D32		8cm

### 3. 若材齢コンクリートを用いた調査

#### 3.1 検証実験概要

超音波横波を用いた調査・診断技術の確立を目指すために、若材齢コンクリートを用いた試験体で検証を行った。状態が刻々と変化する若材齢コンクリートを用い、テストピースによる圧縮試験結果と結果を比較することで、超音波横波を用いた調査・診断手法の信頼性の向上と、診断結果の傾向を把握することができる。特に、本検証では実強度との相関性を確認できるため、縦波を用いた診断と同様に、音波速度から強度を推定するための基礎的データも収集できる。

検証に用いる試験体は、建築の床スラブをモデル化した試験体(写真-2)と、鉄骨建物の基礎梁をモデル化した試験体2体(写真-3、同一形状2体の内1体を示す)である。写真は、コンクリート打設前の配筋状態を示し、打設後の計測位置に対応する領域を矢印で示している。スラブモデルは、一般的な建築建物を想定したもので、配筋はD13の200mmピッチ(かぶり5cmダブル配筋)

である。スラブ厚さは、実測で235mmとなっている。鉄骨建物基礎梁モデルは、断面サイズ950×950mmの梁が3方向から接続されたT形状となっている。配筋はX方向が7-D35、Y方向が7-D32(XY方向ともに、上端筋と下端筋の鉄筋量は同一)と、鉄筋量が多いのが特徴である。特に、梁の交差部は太径の鉄筋がメッシュ状になっており、過密配筋の構造物を想定した検証に適した形状となっている。かぶり厚さは、実測でX方向8cm、Y方向11.5cmである。使用するコンクリートは設計基準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ 、呼び強度 $27\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートとした。コンクリートの配合を表-3に示す。使用する骨材、セメント、混和剤についても広く使用されている材料と配合分量となっている。計測は、計測はスラブモデルで中央1か所、基礎梁モデルでは、試験体を4か所のゾーン(u,c,s,r)に分割し、それぞれの中心位置で計測した。なお、各点XY方向で計測を行っている。

表-3 試験体に用いたコンクリートの配合

呼び強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
27	20	15	54	4	177	328	851	912	3.28

### 3.2 コンクリート強度調査

試験体コンクリート打設時に採取したテストピースを用いて、材齢28日までのコンクリート強度を、圧縮試験により求めた。各材齢における、コンクリートの応力度 - ひずみ度関係の代表例を図-4に、コンクリート圧縮強度 - 材齢関係を図-5に示す。コンクリートの応力度 - ひずみ度関係は、テストピースに貼り付けたひずみゲージの値を用いている。

試験結果より、時間経過に伴いコンクリート強度が漸増していることが確認され、概ね打設から2週間程度で呼び強度  $27\text{N/mm}^2$  を超える値となった。また、応力度 - ひずみ度関係の推移から、ヤング係数も漸増する傾向が見られた。

### 3.3 Vs, Vp を用いた試験結果

Vsは超音波アレクセンサ(横波)試験装置を用いて、X方向とY方向(主筋方向)に試験装置をセットして計測した。Vpは衝撃弾性波法(表面2点法)<sup>2)</sup>の試験装置で計測した。超音波アレクセンサ試験装置を用いた計測状況を写真-4、表面2点法によるVpの計測状況を写真-5に示す。表面2点法とは、コンクリート表面の2点にセンサをそれぞれ置き、2点間を伝搬する縦波の伝搬時間を計測してVp速度を求める方法である。センサ2点

間の距離はVs試験装置本体の計測長さに合わせて330mmとした。試験体の各箇所u,c,s,rのX,Y方向で時系列に計測した。各試験体で計測したVs, Vpの平均値 - 圧縮強度試験結果関係を図-6、図-7に示す。

弾性波伝搬速度 - 圧縮強度の関係から、図-6のスラブモデルでは、Vp, Vs (X, Y方向)ともに圧縮強度によらずほぼ一定の値になった。基礎梁モデルでは、図-7に示すように、主筋方向の計測値が主筋直行方向と比較して大きくなる傾向が見られた。主筋方向で伝搬速度が大きくなる傾向は、横波伝搬速度Vsでも見られたが、Vpと比較して変動は小さく、主筋方向による計測値への影響は小さかった。また、Vpは強度増加とともに増加したのに対し、Vsは若干だが値が減少する傾向が見られた。

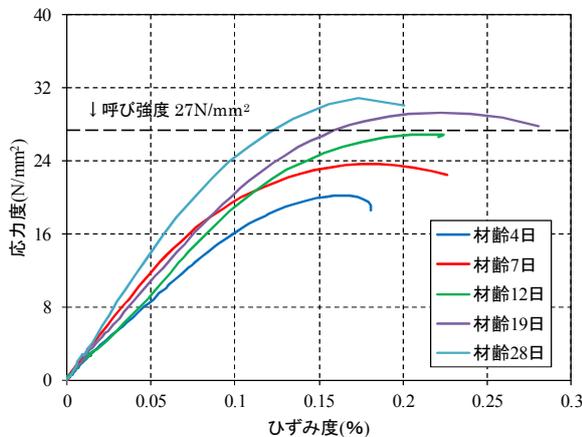


図-4 コンクリートの応力度 - ひずみ度関係

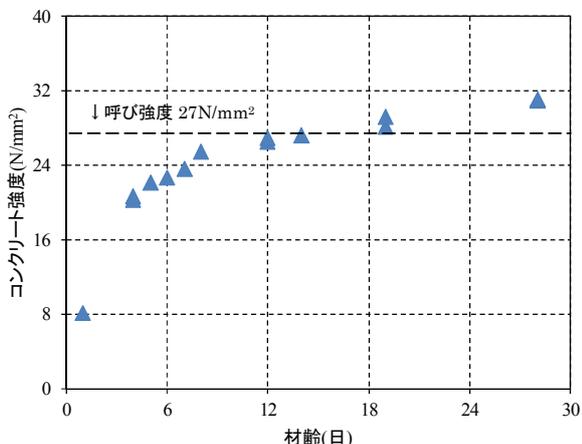


図-5 コンクリート圧縮強度 - 材齢関係



写真-4 超音波アレクセンサ装置によるVs計測

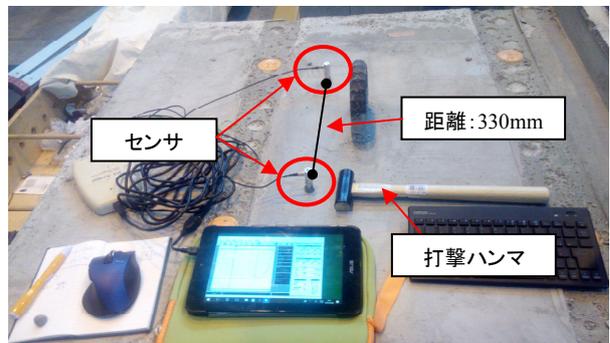


写真-5 表面2点法によるVp計測

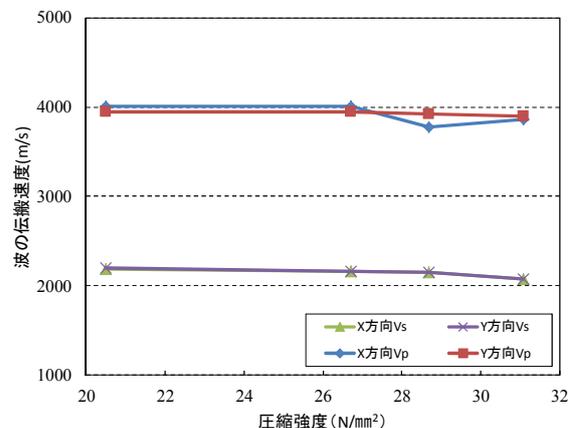


図-6 スラブモデル伝搬速度 - 圧縮強度関係

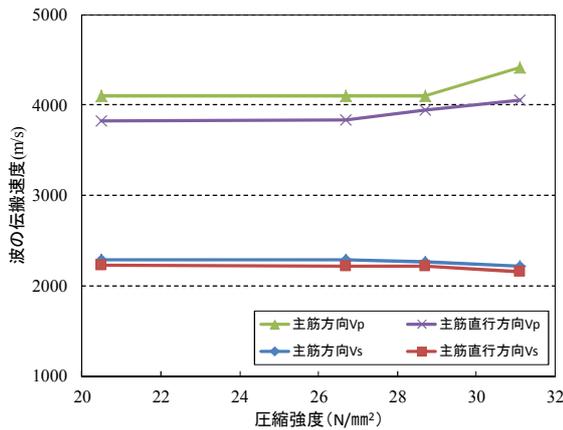


図-7 基礎梁モデル伝搬速度 - 圧縮強度関係

### 3.4 超音波トモグラフィによる内部配筋調査例

超音波アレイセンサ（横波）試験装置を用いて、試験体の天端で計測したトモグラフィ解析の結果の一例を図-8～図-11にそれぞれ示す。図中の表面方向から100mm前後の範囲にみられる局所的な反応は、鉄筋の位置を示している。なお、スラブモデルでは、深さ130～170mmに反応が見られるが、型枠組立時のセパレータと2段目の鉄筋によるものだと考えられる。スラブモデルで見られる深さ約230mm位置の帯状の反応は、板底面からの反射を表し、反応位置は板厚と判断することができる。梁せいが950mmと大きい基礎梁モデルは、底面とみられる帯状の反応は見られない。実測板厚、鉄筋位置との比較は4章で述べるが、計測結果と試験体の形状および配筋は概ね対応しており、計測精度は良好である。

## 4. 考察

### 4.1 Vp, Vs 関係の理論的検証<sup>4)</sup>

コンクリートの物性と弾性波速度の弾性波動論によれば、弾性波は物質の動弾性係数、密度および動ポアソン比に応じた固有の伝搬速度をもっている。よって、材料中を伝搬する弾性波速度  $V$  は式(1)で表される。

$$V = \sqrt{\kappa/\rho} \quad \text{式(1)}$$

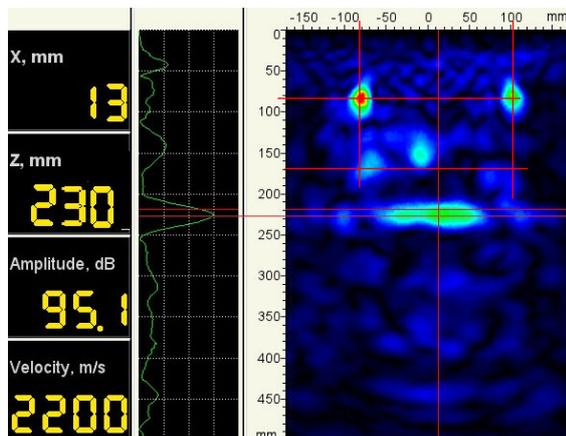


図-8 スラブモデルのY方向

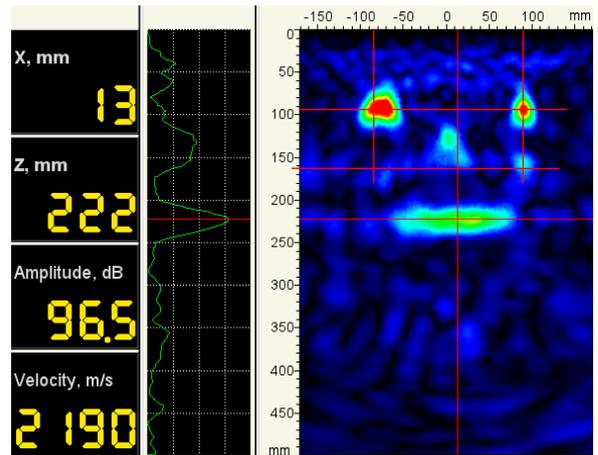


図-9 スラブモデルのX方向

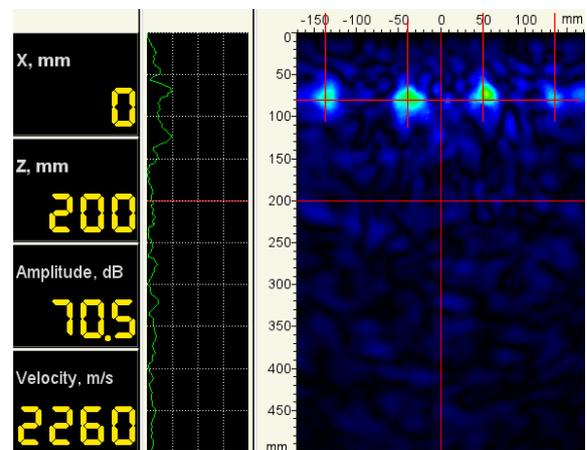


図-10 基礎梁モデルのY方向 (s位置主筋方向)

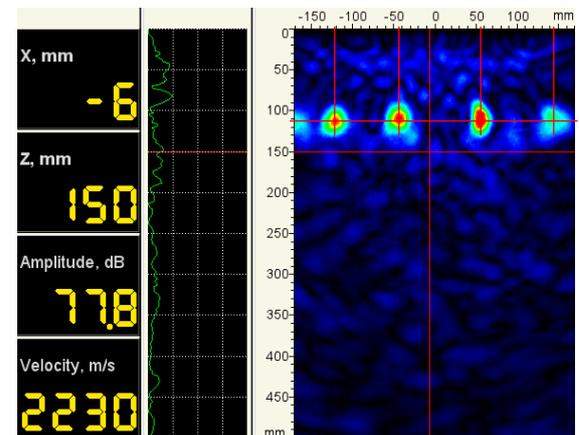


図-11 基礎梁モデルのX方向 (s位置主筋直行方向)

$\kappa$ : 動弾性係数、動ポアソン比の関数  $\rho$ : 密度

式(1)の関係から、縦波伝搬速度  $V_p$  および横波伝播速度  $V_s$  はそれぞれ式(2)、式(3)のように表現される。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad \text{式(2)}$$

$E$ : 動弾性係数  $\nu$ : 動ポアソン比

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{式(3)}$$

$E$ : 動弾性係数  $\nu$ : 動ポアソン比  $G$ : 動せん断弾性係数

この弾性波速度は音響学的性質を表すパラメータであり、コンクリート強度との間に理論的な関係は存在しない。しかし、各種コンクリート構造の設計標準<sup>4)</sup>などに示されているように、実験よりコンクリートの圧縮強度と弾性係数との間には相関性があることも知られている。したがって、コンクリート分野においては、古くから動弾性係数などの動的特性評価のほか、弾性波速度(超音波伝播速度)を用いたコンクリートの強度推定に関する研究が行われてきた。式(2)、式(3)から  $V_p$ 、 $V_s$  の関係式を導くと、式(4)ようになる。

$$V_p = V_s \cdot \sqrt{(2-2\nu)/(1-2\nu)} \quad \text{式(4)}$$

本実験で用いたコンクリートは、圧縮試験の結果からポアソン比が 0.19~0.21 となっていることが確認されている。ここで、動ポアソン比  $\nu$  を 0.2 とすると式(4)より  $V_p=1.83V_s$  となる。基礎梁モデルの計測結果から求めた  $V_p/V_s$  関係を表-4 に示す。

表-4 基礎梁モデルの  $V_p/V_s$  関係

圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	20.5	26.7	28.7	31.1
$V_p$ (Y方向) (m/s)	4098	4104	4104	4413
$V_p$ (X方向) (m/s)	3830	3838	3950	4055
$V_s$ (Y方向) (m/s)	2286	2289	2268	2221
$V_s$ (X方向) (m/s)	2229	2211	2222	2158
$V_p/V_s$ (Y方向)	1.79	1.79	1.81	1.99
$V_p/V_s$ (X方向)	1.72	1.74	1.78	1.88

実測結果より求められた  $V_p/V_s$  は 1.72~1.99 であり、強度上昇とともに値も増加している。詳細な検討は今後必要になるが、式(4)の理論値から算出した値とほぼ同等であり、計測の精度は良好といえる。

#### 4.2 診断結果の板厚、配筋位置の精度検証

各試験体の板厚(スラブモデルのみ)と配筋位置の計測結果と実測値を比較し、精度の検証を行う。スラブモデルの計測結果と実測値を表-5 に示す。また、基礎梁モデルの計測結果と実測値を表-6 に示す。

結果より、スラブモデルの板厚は実測 235mm に対して 233~234mm と高い精度で計測できたことが分かった。鉄筋位置、かぶり厚さについても、実測値に対する計測値の誤差は 8%以内におさまることが確認され、計測精度は実用上十分であることが分かった。

基礎梁モデルでも、鉄筋位置とかぶり厚さの実測値に対する計測値の誤差は 9%以内であった。以上の検証結果から、配筋量の大小にかかわらず精度のよい計測が可能であることが確認された。

#### 5. まとめ

1)  $V_p$ 、 $V_s$  - 圧縮強度関係から、 $V_p$  で強度上昇に伴う伝搬速度増加、 $V_s$  で若干の伝搬速度低下が見られた。これは、

表-5 スラブモデルの計測値と実測値比較

診断項目	計測値(mm)	実測値(mm)	誤差(mm)	誤差率(%)	摘要
上筋かぶり厚	75	70	5	7.1	図-8
	85	80	5	6.3	図-9
鉄筋間隔	190	195	-5	-2.6	図-8
	185	190	-5	-2.6	図-9
床版厚	233	235	-2	-0.9	図-8
	234	235	-1	-0.4	図-9

表-6 基礎梁モデルの計測値と実測値比較

診断項目	計測値(mm)	実測値(mm)	誤差(mm)	誤差率(%)	摘要
上筋かぶり厚	75	70	5	7.1	図-10
	105	115	-10	-8.7	図-11
鉄筋間隔	100	100	0	0.0	図-10
	95	100	-5	-5.0	
	95	100	-5	-5.0	
	90	95	-5	-5.3	図-11
	100	100	0	0.0	
95	100	-5	-5.0		

水分量の変動が大きい若材齢コンクリート特有の問題と推測されるため、今後データ蓄積を行いながら要因を探る必要がある。

2)  $V_p$  と比較して  $V_s$  の方が、主筋方向による計測値の変動が小さいことから、調査部位、調査方向によらず安定した計測結果が得られる可能性が示された。

3)  $V_p$ 、 $V_s$  の関係について、理論値と実測値の比較を行った結果、理論値との対応性は良好だった。

4) 超音波トモグラフィによる板厚、鉄筋位置の計測値と実測値の比較を行った結果、実用上十分な精度を有していることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 坂本浩之、三上創史、牛島栄：超音波トモグラフィ・非破壊検査装置を用いたコンクリート構造物の調査事例、セメントコンクリート、No.810, pp.50-58, 2014.8
- 2) 土木研究所・日本非破壊検査協会：非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル、pp141-148, 2010.8
- 3) 土木学会：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 2004.8
- 4) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [性能照査編]、p.28, 2002.3