

9. 超音波横波トモグラフィ装置によるRC構造物の非破壊試験に関する基礎的検証

Basic Study on Non Destructive Test of RC Structures Using Ultrasonic Tomography Device

新井佑一郎* 坂本浩之** 三上創史** 柳田佳伸* 佐藤俊男*** 牛島栄****

—概要—

社会インフラの長寿命化が求められる今日において、鉄筋コンクリート構造物の改修工事の需要は土木・建築ともに増加している。RC構造物の改修では、既存躯体にアンカー穴削孔やはつり作業が行われるため、内部状況を事前に把握し工事計画を立てることが求められる。これに対し、想定外の位置に鉄筋や電気配管があり、削孔穴と干渉するなどのトラブルが多く発生している。一般に、RC構造物の内部を知るためには、電磁誘導法や電磁波レーダーが用いられるが、調査範囲は深さ10～20cm程度であり、十分な能力を有しているとは言えない。そこで、本研究では新しい非破壊試験法として、超音波横波トモグラフィ装置を用い、鉄筋の検出を行った。さらに、試験装置から得られるせん断波速度 V_s の値を用いて、若材齢コンクリートの弾性波伝搬速度を調査し、従来の縦波の弾性波速度 V_p と比較した。この結果から、せん断波速度 V_s を用いてコンクリート品質を調査するための基本的な検討を行った。

—技術的な特長—

本論で用いる超音波トモグラフィ装置は、写真1で示すように装置底面に超音波横波を起振・受信するセンサが $4 \times 12 = 48$ 個取り付けられている。センサから起振される超音波の周波数は50kHz（標準値）であり、通常非破壊試験で用いられる超音波法（縦波、2～5MHz）と比較して低い。一般に、非破壊試験法では波の周波数が低くなると透過能力が高くなるが、探査精度は低くなる。この問題を解決するため、図1で示すように複数のセンサで起振・受信を繰り返し、経路数を増加させ、周波数を上げることなく精度を向上させている。また、多経路の反射波を検出するため、従来の試験法では対応できなかったダブル配筋の検出も可能となる（図2）。

本試験法は、検出時にせん断波の伝搬速度 V_s の値を得ることができるため、コンクリート強度などの品質評価を検出と同時にすることもできる。これにより、RC構造物内部の状態と、コンクリート品質を同時に計測できるようになるため、調査・診断業務の省力化に貢献できる。



写真1 装置のセンサ配置状況



図1 超音波横波伝搬のイメージ

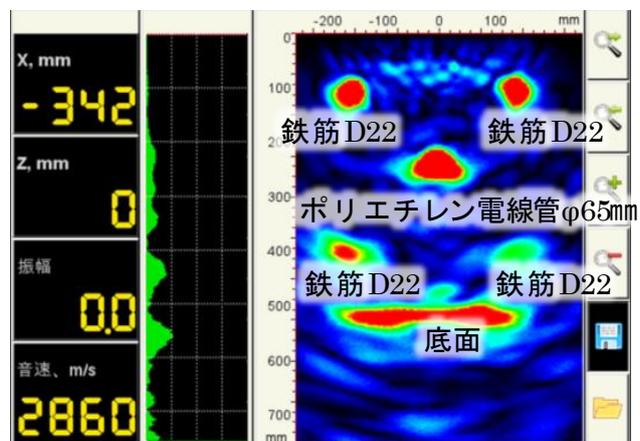


図2 ダブル配筋床版 t=500mm の検出例

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 **（株）地球システム科学 ***技術研究所 企画管理室 ****執行役員 技術研究所長

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¹⁾

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やかぶり厚さ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。

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、

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^{2,3)}

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	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



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

空洞、ジャンカ、はく離、ひび割れ、躯体端面で反射する。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。

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。

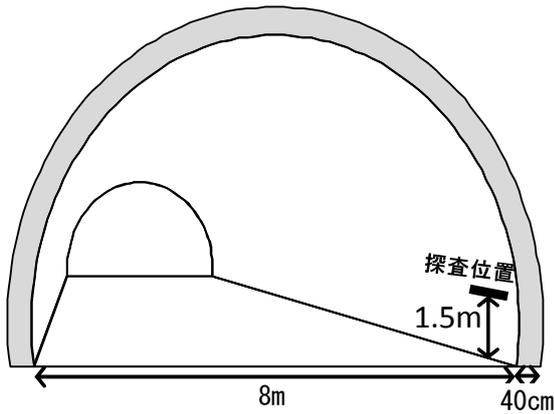


図-2 トンネル覆工試験体のイメージ

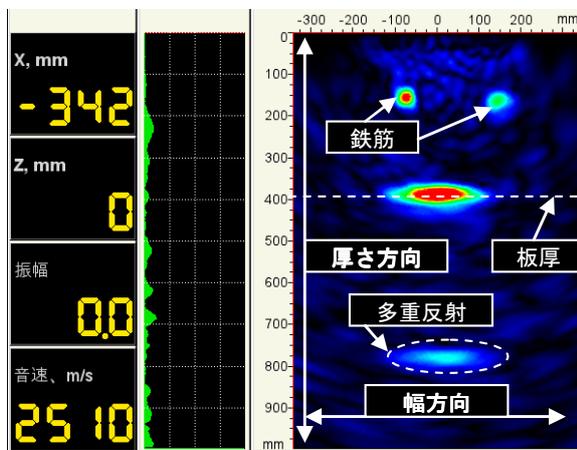


図-3 装置から出力された解析結果

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 V_s 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。

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。

表-3 試験体に用いたコンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	最大骨材寸法 (mm)	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位量(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

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 27N/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、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。

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 27N/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

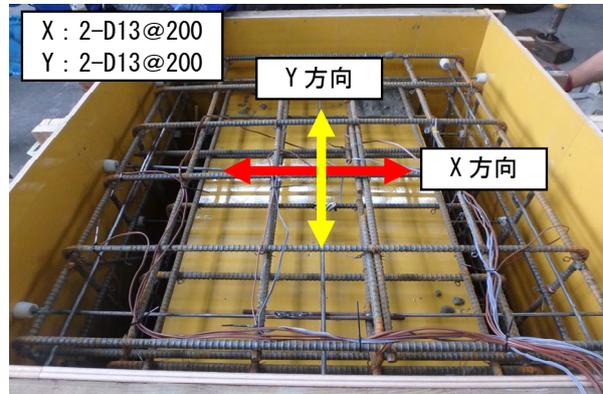


写真-2 スラブモデルの配筋写真と計測位置

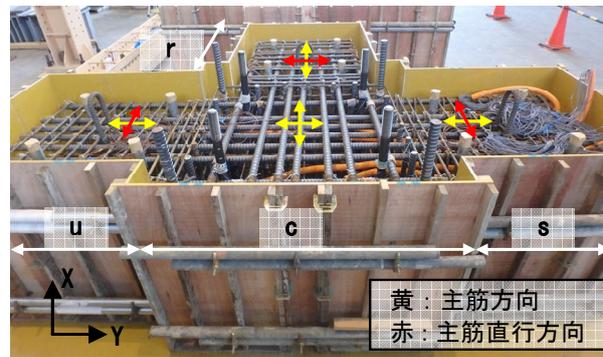


写真-3 基礎梁モデルの配筋写真と計測位置

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

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) ²⁾ の試験装置で計測した。表面 2 点法による Vp の計測状況を写真-4 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-

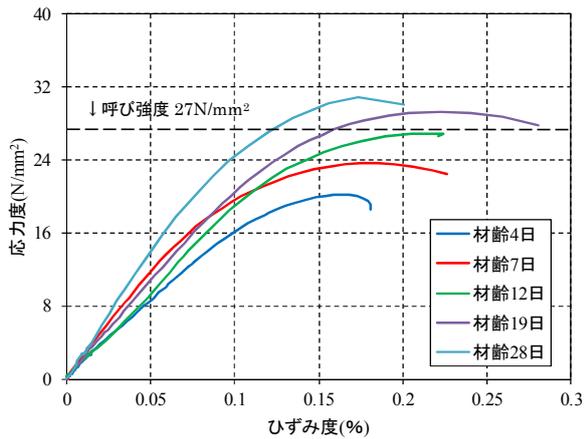


図-4 コンクリートの応力度 - ひずみ度関係

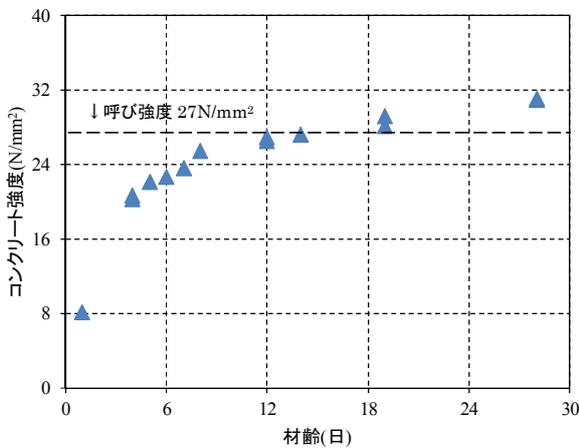


図-5 コンクリート圧縮強度 - 材齢関係

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、 V_p , V_s (X, Y 方向) と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 V_s でも見られたが、 V_p 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、 V_p は強度増加とともに増加したのに対し、 V_s は若干だが値が減少する傾向が見られた。

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-9 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

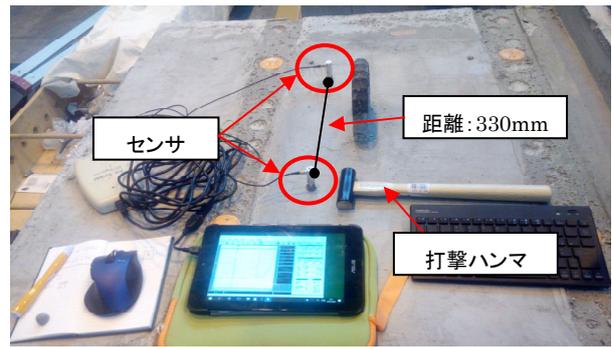


写真-4 表面2点法による V_p 計測

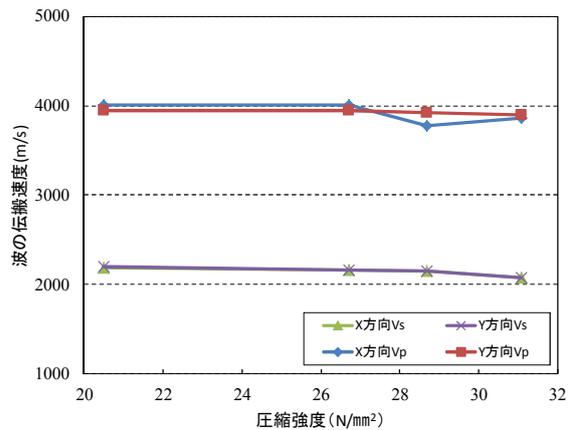


図-6 スラブモデル伝搬速度 - 圧縮強度関係

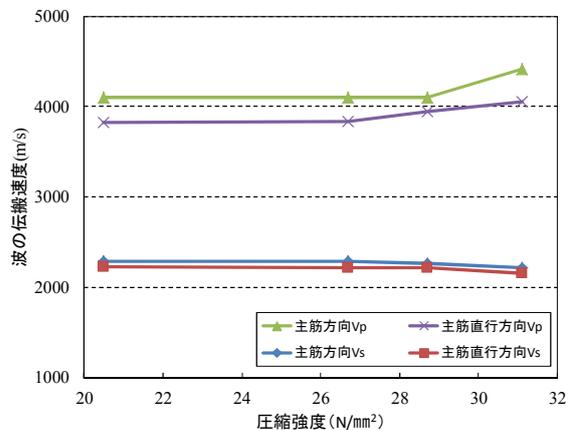


図-7 基礎梁モデル伝搬速度 - 圧縮強度関係

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

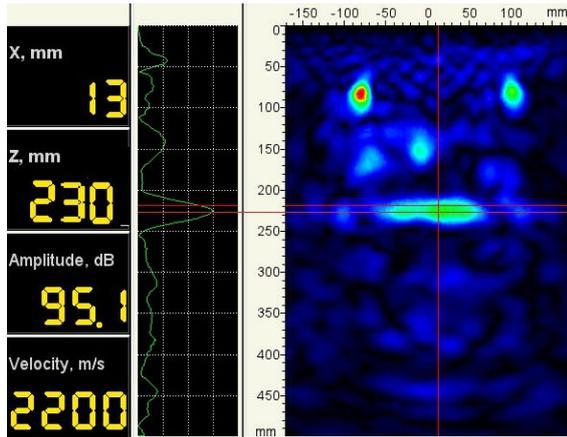


図-8 スラブモデル結果出力

った。以上より、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. V_p 、 V_s 関係の理論的検証⁴⁾

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。

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

κ : 動弾性係数と動ポアソン比の関数 ρ : 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 ν : 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 ν : 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規準^{4)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

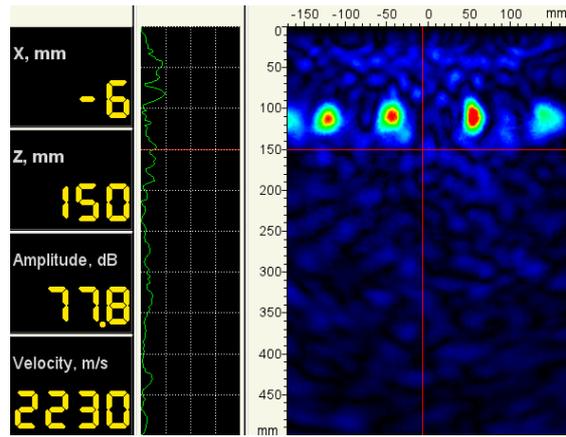


図-9 基礎梁モデル結果出力

表-4 基礎梁モデルの V_p/V_s 関係

圧縮強度(N/mm ²)	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

弾性係数などの動的特性評価のほかに、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)のようになる。

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

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 ν 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。

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。

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、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。

【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