

7. 超音波横波の起振周波数がコンクリート中の横波伝搬速度に与える影響

Effect of Ultrasonic Shear Wave Vibration Frequency on Transverse Wave Velocity in Concrete

新井 佑一郎* 坂本 浩之** 佐藤 俊男*** 牛島 栄****

—概要—

インフラ老朽化対策、国土強靱化に向けて、既存の構造物は適切に調査・診断し、更新や改修の計画を立てることが求められている。特にコンクリート構造物は、内部の施工や劣化状況が、外観から判断できないことが多いため、非破壊的手法による調査・診断が必須となる。本研究では、新しい原理の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、既存 RC 部材の鉄筋位置検出の検証を行ってきた。結果より、従来の手法（電磁波レーダー、電磁誘導法）では不可能だった深い位置の鉄筋検出や多段配筋の検出が可能であることが確認された。本論では、超音波横波の起振周波数と横波伝搬速度に注目し、これまでとは異なる視点で検証を行った。

—技術的な特長—

検証に用いた超音波トモグラフィ装置は、コンクリート部材の横波伝搬速度 V_s を最初に検出し、 V_s を用いて開口合成処理を行い、トモグラフィ画像を作成している。そのため、計測時に V_s の値を得ることができる。 V_s は図 1 で示すように、両端のセンサ（CH1 と CH12）で起振と受信を行い、伝搬時間から算出する。そのため、横波の伝搬経路はコンクリート表面近傍である。また、超音波横波の起振周波数を 10~100kHz（5kHz ピッチ）で可変することができる。

本論では、強度と打設時期が異なる 9 体の無筋コンクリート試験体（呼び強度 21~42N/mm²，材齢 105~182 日）を用い、超音波横波の起振周波数 f を変化させ V_s の値を計測した（1 回目計測）。結果から、図 2 で示すように、9 試験体すべてで起振周波数 f の上昇に伴い V_s の値が低下する現象が見られた。さらに、上記の供試体から 2 種類を抽出し、材齢 510 日時点における V_s - f 関係を計測した（2 回目計測）。結果から、図 3 で示すように V_s - f 関係は上方にシフトし、1 回目計測より増加することが確認された。また、起振周波数 f が高い領域のほうが V_s の増加も大きいことが確認された。

今後は、本性質を応用した、新しいコンクリート部材の調査診断技術の開発を行う予定である。

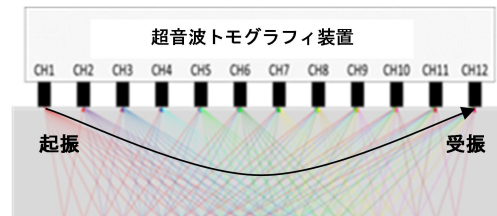


図 1 横波伝搬速度の計測概念

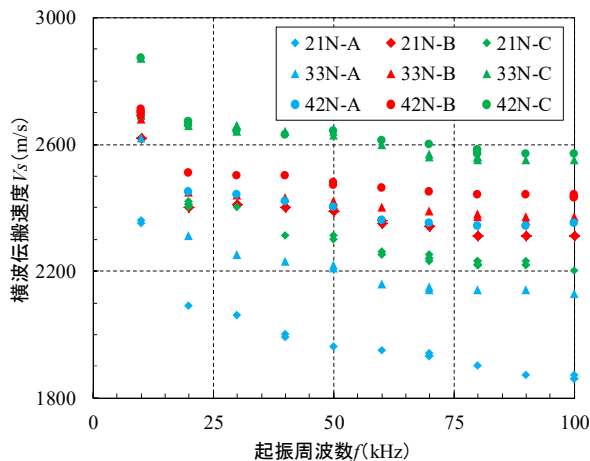


図 2 1 回目計測の V_s - f 関係

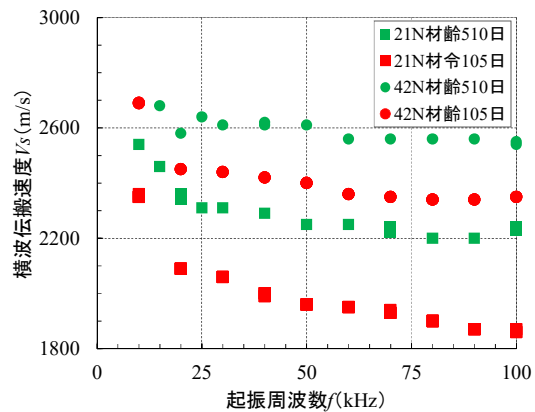


図 3 材齢による V_s - f 関係の変化

*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 研究管理部
****常務執行役員 技術研究所長

超音波横波の起振周波数がコンクリート中の横波伝搬速度に与える影響 Effect of Ultrasonic Shear Wave Vibration Frequency on Transverse Wave Velocity in Concrete

○新井 佑一郎* 坂本 浩之** 佐藤 俊男*** 牛島 栄****
Yuicihoro ARAI Hiroyuki SAKAMOTO Toshio SATO Sakae USHIJIMA

ABSTRACT Nowadays, the demand for infrastructure renovation is increasing, and it is necessary to improve the investigation and diagnosis technology of structures. Especially for concrete structures, it is often impossible to judge the internal construction and deterioration status from the appearance, so it is essential to investigate and diagnose by a non-destructive method. In this study, as a non-destructive test method based on a new principle, we have verified the position detection of reinforcing bars of existing RC members using an ultrasonic transverse wave tomography device. From the results, it was confirmed that it is possible to detect deep reinforcing bars and multi-stage reinforcing bars. In this paper, we examined the effect of the vibration frequency of ultrasonic transverse waves on the transverse wave velocity.

Keywords: 非破壊試験法, 超音波横波, 横波伝搬速度, 起振周波数
Non-destructive test, Ultrasonic shear wave, Transverse wave velocity, Vibration frequency

1. はじめに

社会インフラの老朽化が問題視される今日において、鉄筋コンクリート部材の非破壊試験法に関するニーズは高まっている。RC部材の非破壊試験では、主に電磁誘導、電磁波、X線、超音波を用いた手法が用いられるが、調査目的に応じた方法を選別する必要がある。そのため、複数の項目（例えば、鉄筋位置とコンクリートの内部空隙など）で調査・診断を行う場合は、複数の機器を用いて個別に調査を行わなくてはならず、調査・診断業務の生産性向上の妨げとなっていた。筆者らは、新しい調査の原理として、超音波横波を用いた試験法についての検討を行ってきた¹⁾。RC部材を対象とした従来の非破壊試験法²⁾と、超音波横波を用いた試験法の適用範囲を表1に示す。

超音波横波を用いた非破壊試験法は、表1に示すように多段配筋に対応した鉄筋探査、空隙・欠陥の検出、コンクリート品質の評価を行うことができる。また、探査可能な深さも最大200cmと深いのも特徴である。（無筋コンクリートの場合、配筋量によっては100cm程度まで探査可能な深さが減少する。）ただし、超音波横波を用いた

表1 各非破壊試験法の適用範囲

試験法	探査深さ (cm)	検出項目		
		鉄筋	空隙・欠陥	コンクリート品質
電磁波レーダー	20	○(上筋)	○	×
電磁誘導	10	○(上筋)	×	×
衝撃弾性波	250	×	○	○
超音波横波	200*	○(多段)	○	○

*: 鉄筋量が多い場合は探査深さが浅くなる

非破壊試験法を実構造物に適用するにはデータが不足しているのが現状である。

本試験法の検証は、これまで超音波の起振周波数 f を50kHzに固定し、材料や配筋を変化させて行っていた。検証の結果、周波数を $f=50\text{kHz}$ に固定した状態でも、十分な精度で鉄筋の検出が可能であることが分かった³⁻⁶⁾。

現在、本試験法の適用範囲や最適設定を決定するため、起振周波数をパラメータとした実験を行っている。その中で、コンクリート中を伝搬する超音波横波の基本的な性質を知るため、9種類の無筋コンクリート試験体（材齢105～182日）を用いて横波伝搬速度 V_s と起振周波数 f の関係を調査した。

さらに、上記9種類のコンクリートから2種類を選択し、材齢510日時点の V_s-f 関係を計測し

*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 研究管理部
****常務執行役員 技術研究所長

た。この際、打設面や計測位置（高さ、端面からの距離）の影響を調べるため、1 試験体に対し、複数の位置で計測を行った。

2. 実験方法

2.1 装置の概要

本論で用いた装置は、既報の実験^{3~6)}と同様の超音波横波トモグラフィ装置（ロシア ACS 社製 MIRA-A1040）である。装置には、写真1で示すように超音波横波を発振および起振するセンサが $4 \times 12 = 48$ 個アレイ配置され多経路からの反射波を検出することでトモグラフィ画像を作成する。起振された超音波横波は、音響インピーダンスが異なる面（鉄筋、空隙、ジャンカ、躯体端面等）で反射する。また 図1で示すように CH1 で起振、CH12 で受振することで、計測位置におけるせん断波速度 V_s の値を 1 回計測するごとに得ることができる。計測も写真2で示すように、装置を対象面に押し付けただけなので簡便である。

2.2 試験体概要（1 回目計測）

調査は、強度および打設時期が異なる 1m 角の無筋コンクリート試験体を用い、横波伝搬速度 V_s と起振周波数 f の関係を計測した。実験に用いたコンクリート試験体の諸元を表2に示す。試験体に用いたコンクリートは 3 種類の呼び強度に大別され、強度毎に 3 体製作している。また、同一の呼び強度でも打設時期及び材齢が異なっているため A,B,C で分類している。計測時期はすべての試験体で冬期である。

一般に弾性波速度はコンクリートの高強度化とともに増加する。そのため、横波伝搬速度 V_s についても 21N-A,B,C と比較して、強度が高い 42N-A,B,C 試験体の方が高い値を示すことが予測される。1 回目の計測では、試験体 1 体 1 周波数当たり 5 回で、 $f=10 \sim 100\text{kHz}$ を 10kHz ピッチで行う。そのため、1 体当たりの計測回数は 5 回 \times 10 周波数で 50 回となり、バラつきを評価する上で十分なデータ数が得られると考えられる。



写真1 装置のセンサ配置状況

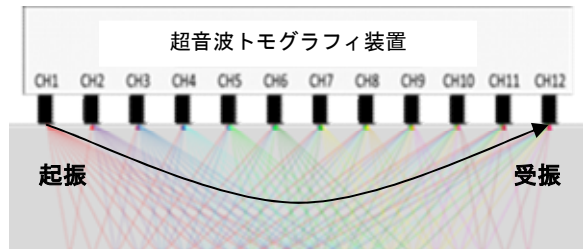


図1 横波伝搬速度の計測イメージ



写真2 計測状況

2.3 試験体概要（2 回目計測）

計測に用いる試験体は、2.2 節の 1 回目計測で用いた無筋コンクリート試験体 9 体から、表 3 に示すようにコンクリート呼び強度が異なる 2 体を抽出した。呼び強度 21N/mm^2 の試験体を 21N-A、 42N/mm^2 の試験体を 42N-A と称する。形状は図2で示すように 1m 角の立方体である。試験体は、標準期に打設し、屋外で 510 日間暴露した。試験体の設置状況は 21N-A、42N-A 試験体と

表2 1回目の計測で用いた試験体のコンクリートの諸元

試験体名	21N-A	21N-B	21N-C	33N-A	33N-B	33N-C	42N-A	42N-B	42N-C
呼び強度	21N/mm ²			33N/mm ²			42N/mm ²		
打設時期	標準期	夏期	夏期	標準期	夏期	夏期	標準期	夏期	夏期
材齢(日)	105	182	156	105	182	156	105	182	156
計測時期	冬期(1月)								

もに東西面が開放され、風及び日照を受けている。南北面は 21N-A 試験体で北面開放、南面隣接、42N-A 試験体で南北面ともに隣接している。ここで、隣接とは 20cm 程度の間隔でコンクリート試験体が並んだ状態である。開放面については、東側に建物(約 20m 離れた位置に 3 階建て建物が立地)があるため、西側のほうが日射を受けている時間が長い。計測は、各試験体とも東・西面とし、1 面当たり 6 点の計測点を設けた。計測位置の名称は、試験体呼び強度と東西(E,W)ー上下位置、水平位置番号で表す(例: 21E-下②)。超音波横波トモグラフィ装置を用い、起振周波数を 10~100kHz の範囲で変化(5kHz or 10kHz ピッチ)させ、各点の V_s を計測した。

3. 検証結果

3.1 1回目計測の計測結果

計測により得られた横波伝搬速度 V_s と起振周波数 f の関係を図 3 に示す。図中には計測により得られたすべての値(1 体当たり 50 点×9 体=450 点)をプロットしている。プロットの色はシリーズ A,B,C を、プロットの形は強度をそれぞれ分類している。結果より、呼び強度が高い試験体で V_s が高い値を示し、同一シリーズ内では $\bigcirc > \triangle > \diamond$ となり、呼び強度の順となった。赤で示す B シリーズは総じて V_s の値が大きかったが、これは材齢が 182 日と他の試験体よりも長く、打設時期も夏期であったため、強度発現が進んだためだと考えられる。

周波数依存性については、すべての試験体で起振周波数 f の上昇に伴い横波伝搬速度 V_s の低下が見られた。また、得られた V_s を f で除し、波の波

表3 試験体諸元

試験体名	21N-A	42N-A
呼び強度	21N/mm ²	42N/mm ²
打設時期	標準期	
材齢(日)	510	
計測時期	春期(3月)	
東面	開放	開放
西面	開放	開放
南面	隣接	隣接
北面	開放	隣接

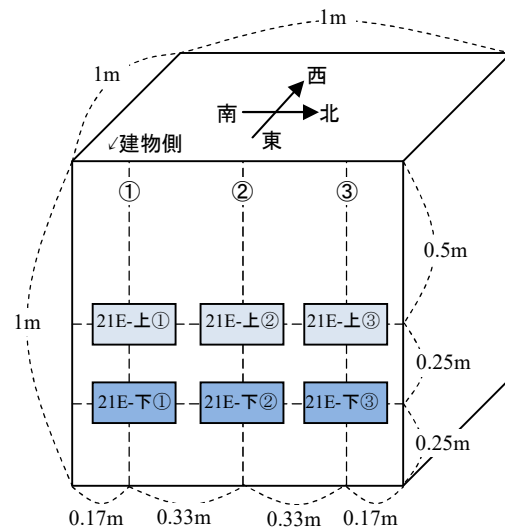


図2 2回目計测试験体の計測位置

長 λ に換算した。代表例として、呼び強度を基準に 3 パターンを選択し、 V_s と λ の関係を整理したグラフを図 4 に示す。結果から、 λ の増加に伴い V_s が増加する関係が示された。また、グラフ中には指数関数で近似した曲線を追加している。その結果、 R^2 は 0.84~0.96 と高い値を示し、強い相関性が確認された。値の変化量については、高強度よりも低強度の方が大きくなった。なお、 $\lambda=10\text{cm}$ 前後では近似線を下回り、 $\lambda=20\sim30\text{cm}$ では上回る現象がすべての試験体で見られた。現段階では V_s, f, λ の関係を指数関数で近似しているが、周波

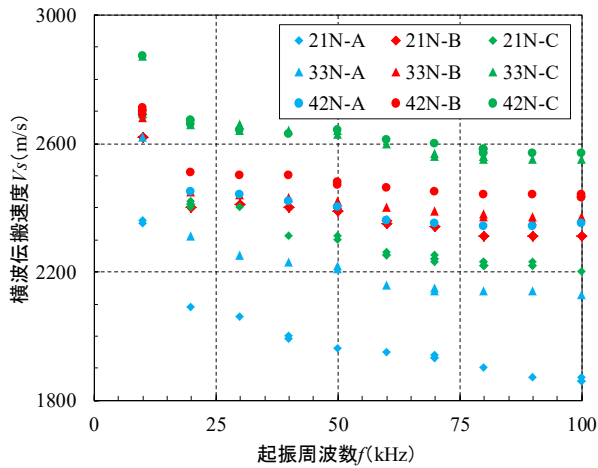


図3 横波伝搬速度 V_s - 起振周波数 f 関係

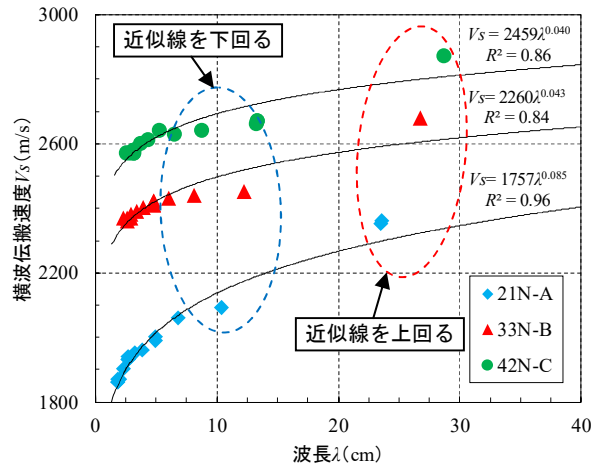


図4 横波伝搬速度 V_s - 波長 λ 関係

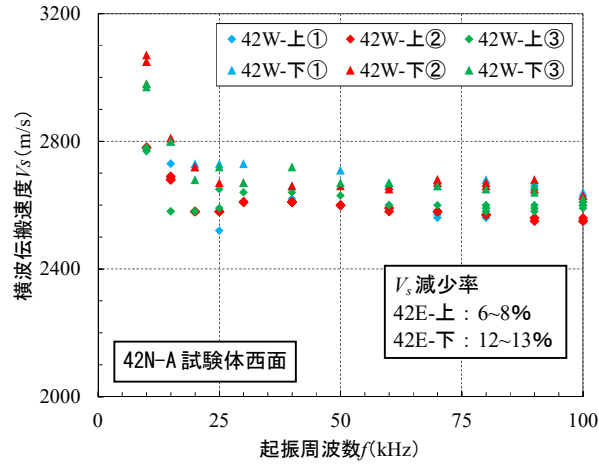
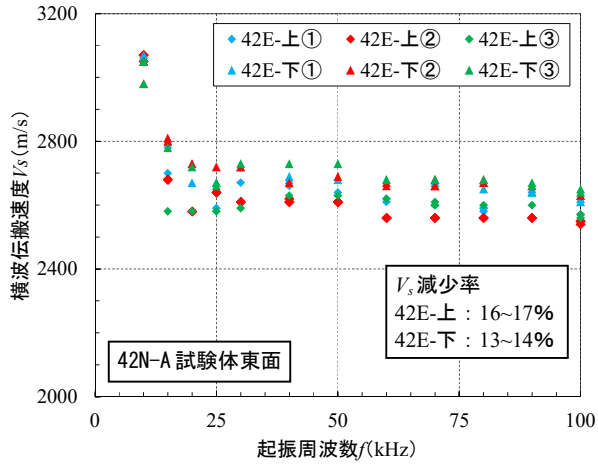
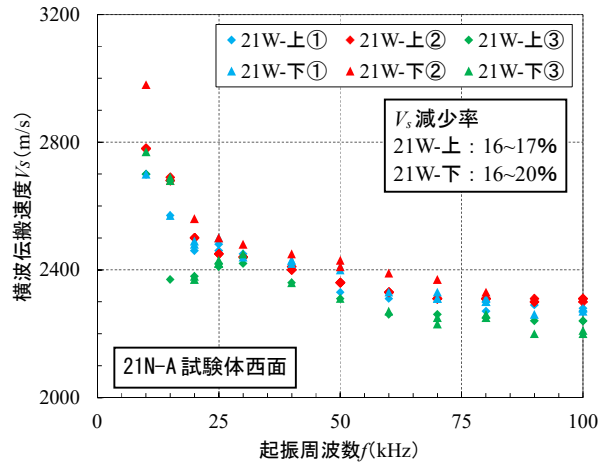
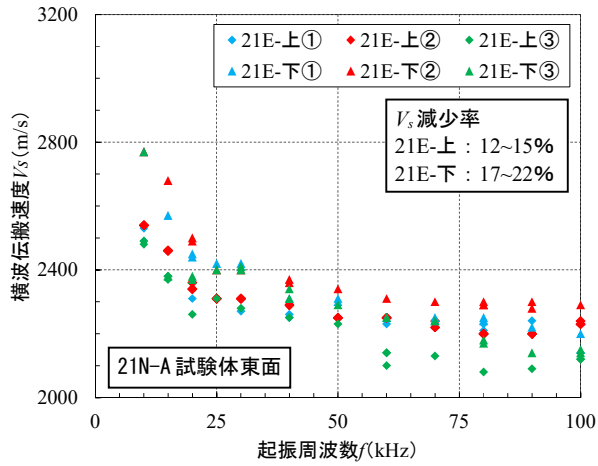


図5 2回目計測時の起振周波数 f - 横波伝搬速度 V_s 関係

数依存性に関する現象を今後分析し、予測式の精度を高める必要がある。

3.2 2回目計測の計測結果

2回目計測結果を試験体の計測面ごとに示し

たグラフを図5に示す。グラフのプロットは水平位置ごとに色分けし、上段を◆下段を▲で表している。結果より、すべての計測面で1回目計測と同様に、起振周波数 f の増加に伴い、横波伝搬速度 V_s が低下する傾向が見られた。

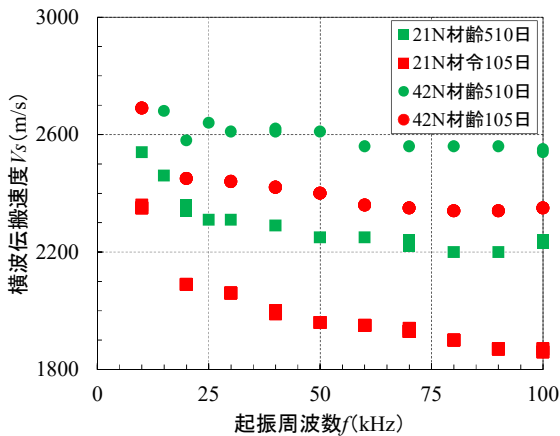


図6 材齢による V_s - f 関係の変化

また、グラフ中には各計測面の $V_s(10\text{kHz})$ に対する $V_s(100\text{kHz})$ の減少率も載せている。 V_s 減少率は、42N-A 試験体の方が 21N-A 試験体よりも小さかった。検査位置については、42N-A 試験体東面（位置番号 42E）を除き、上が下と比較して小さくなった。また、21N 試験体では 25kHz 以上で V_s がなだらかに減少する傾向が見られたが、42N-A 試験体では 20kHz 以上でほぼ一定値となった。計測面の方向については、21N-A 試験体で日射量が多い西面の方が V_s - f 関係が大きくなったが、42N-A 試験体では有意な差が見られなかった。

経年変化を確認するため、1 回目計測と計測位置が近い各試験体の東面の上②位置の結果と 1 回目計測時の値（材齢 105 日）を比較したグラフを図 6 に示す。結果より、材齢が長くなるにつれて V_s - f 関係が上方にシフトする傾向が確認された。また、増加率は起振周波数 f が高い領域の方が大きいことも確認された。

4. せん断波速度と周波数の依存性に関する考察

3 種類の強度水準で構成された無筋コンクリート試験体の横波伝搬速度 V_s -周波数関係 f から、起振周波数が高くなるにつれて横波の伝搬速度速度が低下する現象が確認された。その要因について考察する。

一般に、コンクリートは脱型後から表面が乾燥

表 4 波の伝搬速度と各値の関係

波の伝搬速度	遅 ← → 速
含水率	小 ← → 大
総有効細孔量	大 ← → 小

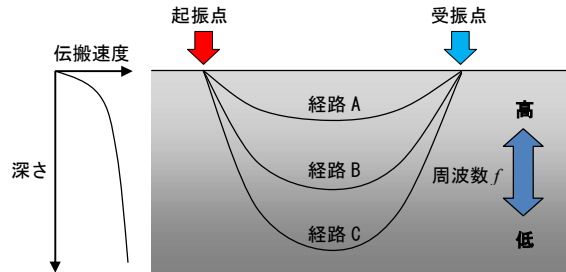


図7 コンクリート中の弾性波伝搬イメージ

し、含水率が低下する。また、有効細孔量分布も表面になるにつれて大きくなり、細孔構造が粗いコンクリートとなる。その範囲は、水セメント比 60% 程度の普通コンクリートでは、表面から 5cm 程度の範囲であり、それより深い範囲では概ね一定値となる⁷⁾。また、緻密な高強度コンクリートの場合、含水率の低下領域および有効細孔量が大きくなる領域は、普通コンクリートよりも浅くなる。コンクリート中を伝搬する弾性波と含水率および総有効細孔量の関係は表 4 のようになる⁸⁾。以上の関係から、コンクリート内部を伝搬する波は図 7 の模式図のように、伝搬経路により速度が異なる。波の伝搬速度は、表面よりも内部の方が大きいため、領域 C > 領域 B > 領域 A の関係となる。

本論の検討より、コンクリート中を伝搬するせん断波速度 V_s と周波数に依存性があることが確認された。その要因として、周波数が高くなるにつれてコンクリート中を伝搬する波の振動領域が狭くなり、表面側を伝搬することが考えられる。現段階ではデータが不足しているため、傾向と考えられる要因を示し、詳細は今後の検討課題とする。

5. まとめ

本論では、無筋コンクリート試験体を用い横波伝搬速度 V_s と起振周波数 f の関係を調査した。得

られた知見を以下に示す。

- 1) 起振周波数 f の増加とともに横波伝搬速度 V_s が減少する傾向が見られた。
- 2) コンクリートが高強度化すると、全体的に V_s は増加する傾向が見られ、 $V_s \cdot f$ 関係は上昇する。また、起振周波数 f の増加に伴う V_s の減少率は、コンクリート強度が高いほど低い値になる。
- 3) 日射を受ける面の方が $V_s \cdot f$ 関係の変化（減少率）は小さい。特にコンクリート強度が低いほど、日射を受けている面と受けていない面の $V_s \cdot f$ 関係の変化（減少率）が大きい。

今後も継続的に計測を行い、新しい調査・診断技術への応用を目指す。

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, pp.141-148, 2010.8
- 3) 新井 佑一郎, 坂本 浩之, 三上 創史, 牛島 栄: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1831-1836, 2017.7
- 4) 新井 佑一郎, 坂本 浩之, 三上 創史, 佐藤 俊男, 牛島 栄: 超音波横波トモグラフィ装置によるコンクリート内部調査事例, 土木学会 第72回年次学術講演梗概集, pp.509-510, 2017.9
- 5) 新井 佑一郎, 坂本 浩之, 三上 創史, 牛島 栄: 超音波横波トモグラフィ装置による配合が異なるRC壁の鉄筋探査事例, 土木学会 第73回年次学術講演梗概集, pp.343-344, 2018.8
- 6) 新井 佑一郎, 坂本 浩之, 柳田 佳伸, 牛島 栄: 超音波横波トモグラフィ装置を用いたRC構造物の診断における周波数依存性の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1847-1852, 2019.7
- 7) 湯浅 昇, 笠井 芳夫, 松井 勇: 乾燥を受けたコンクリート表面から内部にわたる含水率・細孔構造の不均質性, 日本建築学会構造系論文集, 509号, pp.9-16, 1998.7
- 8) 湯浅 昇: 非（微）破壊試験のための構造体コンクリートの物性解説, 日本非破壊試験協会, 非破壊検査, Vol.53, No.9, pp.538-544, 2005.9